

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

Rázové jevy ve vinutí modelem EMTP-ATP  
Transients in winding modeled by EMTP-ATP

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Daniel Socha**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika  
Téma: **Rázové jevy ve vinutí modelem EMTP-ATP**  
**Transients in winding modeled by EMTP-ATP**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Problematika rázových jevů ve vinutí elektrických strojů
2. Porovnání teorie s modelem homogenní cívky v EMTP-ATP
3. Řešení rázových jevů v modelu reálného transformátoru po úderu blesku do vedení

Seznam doporučené odborné literatury:


Mach, V: Technika vysokého napětí. Ostrava : ES VŠB-TUO, 2006. 114 s. ISBN 80-248-1161-8

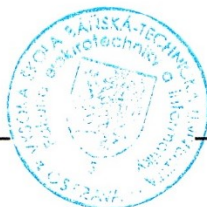
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Veleslav Mach**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
*vedoucí katedry*



  
prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
*děkan fakulty*

# Prohlášení studenta

---

*„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“*

V Ostravě, dne: 30.4.2018

Jméno a příjmení: Bc. Daniel Socha

Podpis: .....

# Poděkování

---

*„Rád bych poděkoval doc. Dr. Ing. Věslavu Machovi za cenné rady, věcné připomínky, vstřícnost při konzultacích, za spolupráci při získávání údajů a vypracování mé diplomové práce.“*

# Abstrakt

---

Tématem diplomové práce je analýza rázových jevů ve vinutí elektrických strojů. Cílem práce je tvorba modelu homogenní cívky v programu EMTP-ATP, který by v budoucnu mohl sloužit jako učební pomůcka pro studenty Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava (VŠB-TUO). Dalším cílem je analýza rázových jevů v transformátoru 22/0,4 kV, který je součástí distribuční soustavy 22 kV napájené z nadřazené soustavy 110 kV. Zdrojem rázového jevu bude atmosférický impulz, který zasáhne jednu fázi vedení. Model distribuční soustavy bude třífázový.

## Klíčová slova

---

Rázové jevy, vinutí, distribuční soustava, přepětí, EMTP-ATP, atmosférický výboj, blesk.

# Abstract

---

The topic of this diploma thesis is the analysis of impact phenomena in the winding of electric machines. The aim of the thesis is to create a homogeneous coil model in the EMTP-ATP program, which could serve as a teaching aid for students of the VŠB - Technical University of Ostrava (VŠB-TUO) in the future. Another objective is the analysis of impact phenomena in the transformer 22/0,4 kV, which is part of the 22 kV distribution system supplied from the 110 kV system. The source of the shock phenomenon will be the atmospheric impulse that will hit one phase of the lead. The distribution system will be modeled three-phase.

## Key Words

---

Impact phenomena, winding, distribution system, overvoltage, EMTP-ATP, atmospheric discharge, flash.

# Obsah

---

Seznam použitých symbolů a zkratk .....	8
Seznam obrázků .....	9
Seznam tabulek .....	10
Úvod.....	11
1 Rázové jevy v cívce.....	12
1.1 Náhradní schéma [1][2].....	12
1.2 Počáteční rozložení napětí cívky [1][2].....	13
1.3 Konečné rozložení napětí cívky [1][2].....	15
1.4 Volné kmity cívky s uzemněným koncem [1][2].....	16
1.5 Volné kmity cívky pomocí Carsonovy transformace [1] .....	17
1.6 Volné kmity cívky s izolovaným koncem [1][2].....	19
2 Modelování rázových jevů v cívce.....	20
2.1 Parametry cívky.....	20
2.2 Model v programu ATP .....	22
2.3 Měření rázových jevů v uzemněné cívce pomocí programu ATP .....	25
2.4 Měření rázových jevů v izolované cívce pomocí programu ATP .....	27
2.5 Měření rázových jevů v cívce pomocí programu Rázové jevy .....	28
2.6 Výpočet rázových jevů v uzemněné cívce pomocí výpočtu .....	30
2.7 Výpočet rázových jevů v izolované cívce pomocí výpočtu .....	33
2.8 Srovnání výsledků.....	35
3 Modelování rázových jevů v distribuční soustavě .....	37
3.1 Parametry transformátoru.....	37
3.2 Odezva distribučního transformátoru na jednotkový skok.....	38
3.3 Model distribuční soustavy v ATP .....	44
3.4 Zásah distribuční soustavy atmosférickým výbojem .....	47
3.5 Ochrana transformátoru svodičem přepětí .....	51
Závěr .....	54
Literatura .....	56
Seznam elektronických příloh.....	57



## Seznam použitých symbolů a zkratk

<b>Značka(jednotka)</b>	<b>Veličina</b>
$R(\Omega)$	činný odpor
$L(\text{H})$	vlastní indukčnost cívky
$C(\text{F})$	kapacita vůči zemi
$K(\text{F})$	mezizávitová kapacita
$l(\text{m})$	délka cívky
$x(\text{m})$	vzdálenost uzlu cívky od počátku
$\omega(\text{rad/s}, 1/\text{s})$	uhlová frekvence
$n(-)$	řád harmonické

## Seznam obrázků

Obrázek 1 – Náhradní schéma cívky podle Wagnera [1].....	12
Obrázek 2 – Počáteční rozložení napětí pro různé hodnoty $\gamma l$ cívky s uzemněným koncem (vlevo) a izolovaným koncem (vpravo) [1] .....	14
Obrázek 3 – Počáteční $u_0$ a koncové $u_k$ rozložení napětí [1] .....	15
Obrázek 4 – Schéma cívky s uzemněným koncem (nahore) a s izolovaným koncem (dole) v programu ATP .....	23
Obrázek 5 – Schéma cívky po provedeném seskupení .....	24
Obrázek 6 – Graf počátečního rozložení napětí cívky s uzemněným koncem z dat programu ATP ....	25
Obrázek 7 – Časové průběhy napětí uzlech v $\frac{1}{4}$ cívky .....	25
Obrázek 8 – Časový průběh napětí v 68. uzlu cívky v oblasti maxima .....	26
Obrázek 9 – Rozložení napětí podél cívky v čase maximálního přepětí.....	26
Obrázek 10 – Počáteční rozložení napětí cívky s izolovaným koncem z dat ATP .....	27
Obrázek 11 – Časový průběh napětí na izolovaném konci cívky z ATP .....	27
Obrázek 12 – Počáteční rozložení napětí cívky s uzemněným koncem pomocí Rázové jevy .....	28
Obrázek 13 – Časový průběh napětí cívky s uzemněným koncem v místě maximálního přepětí .....	28
Obrázek 14 - Rozložení napětí cívky s uzemněným koncem pomocí Rázové jevy v čase maximálního přepětí.....	29
Obrázek 15 - Časový průběh napětí cívky s izolovaným koncem na konci cívky .....	29
Obrázek 16 – Počáteční a koncové rozložení napětí cívky s uzemněným koncem .....	31
Obrázek 17 – Časový průběh napětí v uzlu 68.....	32
Obrázek 18 – Rozložení napětí podél cívky s uzemněným koncem.....	33
Obrázek 19 - Počáteční a koncové rozložení napětí cívky s izolovaným koncem.....	34
Obrázek 20 - Časový průběh napětí na izolovaném konci cívky .....	35
Obrázek 21 - Schéma primárního vinutí distribučního transformátoru.....	39
Obrázek 22 - Průběh napětí v čase na začátku, v maximu a na konci fáze A .....	39
Obrázek 23 - Rozložení napětí podél fáze A a fáze B (stejně podél fáze C, která je paralelně k B) ....	40
Obrázek 24- Schéma primárního vinutí distribučního transformátoru napájeného dvěma DC zdroji ..	41
Obrázek 25 - Časový průběh první periody napětí podél vinutí transformátoru napájeného do 2 fází jednotkovým skokem .....	42
Obrázek 26 - Časový průběh dalších period napětí podél vinutí transformátoru napájeného do 2 fází jednotkovým skokem .....	43
Obrázek 27 - Rozložení napětí podél napájené fáze A a uzemněné fáze B .....	44
Obrázek 28 - Schéma distribuční soustavy .....	44
Obrázek 29 - Proudový impulz 8/20 představující blesk .....	45
Obrázek 30 - Distribuční transformátor 22/04 kV (GROUP "trafo") .....	46
Obrázek 31 - Časové průběhy napětí na kocích vedení .....	47
Obrázek 32 - Příchod první napěťové vlny na konec vedení .....	48
Obrázek 33 – Odrazy a šíření vln po vedení .....	48
Obrázek 34 – Průběh napětí na vstupu fáze A, B, C po úderu blesku do vedení .....	49
Obrázek 35 – Časový průběh napětí v uzlech podél fáze A.....	49
Obrázek 36 – Rozložení napětí podél vinutí transformátoru po úderu blesku do vedení .....	50
Obrázek 37 – Schéma distribuční soustavy se svodičem přepětí .....	51

Obrázek 38 - Časový průběh napětí po reakci svodiče přepětí .....	52
Obrázek 39 – Časový průběh napětí v uzlech podél fáze A.....	52
Obrázek 40 - Rozložení napětí podél vinutí transformátoru, jemuž je předřazen svodič přepětí .....	53

## Seznam tabulek

Tabulka 1 – Parametry cívky .....	20
Tabulka 2 – Parametry na metr délky .....	20
Tabulka 3 – Parametry pro jeden délkový element .....	21
Tabulka 4 – Srovnání výsledků pro cívku s uzemněným a izolovaným koncem.....	35
Tabulka 5 - Absolutní a relativní odchylka .....	36
Tabulka 6 - Parametry jedné fáze primárního vinutí transformátoru [5] .....	37
Tabulka 7 – Parametry pro jeden délkový element .....	38

## Úvod

Tématem diplomové práce je problematika rázových jevů ve vinutí elektrických strojů. Elektrické stroje jsou charakterizovány třemi základními parametry – indukčnost, kapacita vinutí a kapacita vůči zemi. Toto seskupení indukčností a kapacit vytváří oscilační obvod, ve kterém vzniká, po přivedení energie, přechodný děj. Tento přechodný děj má za následek značná přepětí, která mohou způsobit ztrátu izolačních schopností a stárnutí izolace. Nejčastějším zdrojem rázových jevů jsou atmosférické výboje a spínací přepětí.

Cílem je sestavení modelu homogenní cívky v programu EMTP-ATP, který by v budoucnu mohl sloužit jako učební pomůcka pro studenty Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava (VŠB-TUO).

Program EMTP-ATP je univerzální programový systém pro digitální simulaci přechodných jevů elektromagnetické i elektromechanické povahy. Vlastní program ATP je napsán v jazyce Fortran a byl původně určen pro systém MS-DOS. Pro využití programu ATP na novějších systémech Windows byl vyvinut grafický, myši řízený preprocesor ATPDraw.

Samotný začátek práce je věnován teoretickému úvodu. Teorie obsahuje popis náhradního schématu podle Wagnera, problematiku počátečního a koncového rozložení napětí, přechod mezi počátečním a koncovým rozložením napětí realizovaný volnými kmity v cívce s uzemněným a izolovaným koncem i alternativní řešení pomocí Carsonovy transformace.

Druhá část se zabývá modelováním rázových jevů v cívce s uzemněným i izolovaným koncem. Na začátku kapitoly jsou uvedeny parametry cívky, která slouží jako předloha pro tvorbu modelu. Parametry cívky vychází ze samostatného programu zadaného v předmětu Technika vysokého napětí (TVN) doc. Dr. Ing. Věslava Macha. Následuje popis modelu vytvořeného pomocí EMTP-ATP. Poté bude provedena simulace rázových jevů pomocí tří způsobů: EMTP-ATP, program Rázové jevy a vlastní výpočet pomocí teoretických vzorců v Microsoft Excel. Celá kapitola bude završena krátkým srovnáním dosavadních výsledků.

Třetí část obsahuje modelování rázových jevů v distribuční soustavě. V této kapitole je využit model cívky z kapitoly druhé pro tvorbu primárního vinutí transformátoru 22/0,4 kV, jehož parametry pramení ze skutečného trojfázového transformátoru typu 8 ERH 33M-O o zdánlivém výkonu 40 MVA. Následně je provedena odezva transformátoru na jednotkový skok a poté na atmosférický výboj. Poslední část této kapitoly je zaměřena na ochranu zařízení distribuční soustavy svodiči přepětí.

V závěru je uvedeno celkové zhodnocení výsledků a výsledných průběhů, posouzení chyb, odchylek a objasnění jejich geneze.

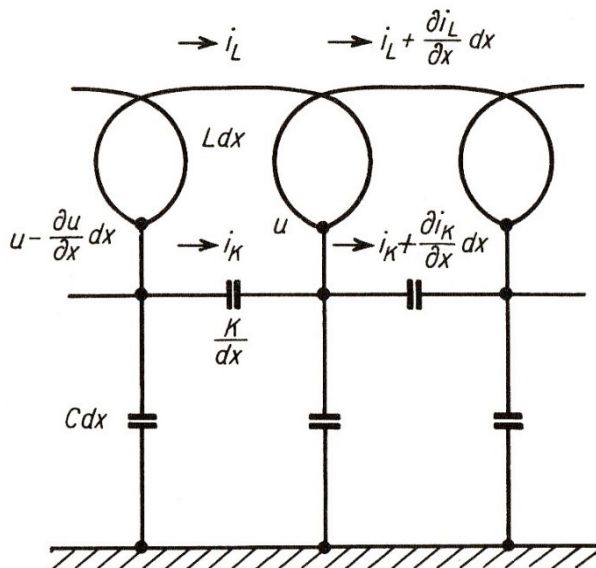
## 1 Rázové jevy v cívce

Během rázového jevu se cívka chová jako seskupení kapacit a indukčností, které vytvářejí oscilační obvod. Nejprve se projeví účinek kapacit a na konci se projevuje účinek indukčností. Přechod z prvního stavu do druhého je realizován pomocí volných kmitů.

### 1.1 Náhradní schéma [1][2]

Oproti vedení je každý závit (délkový element) cívky vázán se všemi ostatními elementy elektrostatičticky i elektromagneticky. V této práci bude použito náhradní schéma dle Wagnera tvořené bezztrátovým vedením (zanedbnání elektrického odporu), které je charakterizováno indukčností  $L$ , dále mezizávitovou kapacitou  $K$  a kapacitou závitů proti zemi  $C$ .

Délka  $x$  ve schématu je orientována podél osy cívky od vstupní svorky ke konci samotné cívky. Cívka je charakterizována v každém místě okamžitým napětím  $u$  proti zemi, okamžitým proudem ve vodiči  $i_L$  a okamžitým proudem přes kapacitu  $i_K$  mezi jednotlivými závity. Osová délka cívky je označena  $l$ , tudíž výsledná kapacita cívky k zemi je dána součinem  $Cl$  (na jeden element připadá kapacita vůči zemi  $C dx$ ) a celková mezizávitová kapacita  $K/l$  (na jeden element připadá kapacita  $\frac{K}{dx}$ ).



Obrázek 1 – Náhradní schéma cívky podle Wagnera [1]

Ze schématu (viz Obrázek 1) vycházejí následující rovnice v místě  $x$  v čase  $t$ , počítaného od okamžiku, kdy se na vstupní svorce objeví napěťová vlna

$$-\frac{\partial i_L}{\partial x} dx - \frac{\partial i_K}{\partial x} dx = C dx \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$i_K = \frac{K}{dx} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left( -\frac{\partial u}{\partial x} dx \right)$$

$$-\frac{\partial u}{\partial x} dx = L dx \frac{\partial i_L}{\partial t}$$

Derivací první rovnice podle  $t$  a dosazením druhé a třetí rovnice získáme diferenciální rovnici pro napětí při rázovém jevu

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + LK \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} = 0$$

## 1.2 Počáteční rozložení napětí cívky [1][2]

V čase  $t = 0$ , čili v čase, kdy se objeví ráz napětí na vstupní svorce, se uplatňují pouze kapacity vinutí. Příslušné počáteční rozložení napětí získáme z náhradního kapacitního schématu. Pokud  $q_0$  je náboj na kapacitě  $\frac{K}{dx}$  a  $u_0$  napětí na kapacitě  $C dx$ , pak v místě  $x$  platí rovnice

$$-dq_0 = C dx u_0$$

$$-du_0 = \frac{q_0}{\frac{K}{dx}}$$

Úpravou těchto rovnic získáme

$$\frac{d^2 u_0}{dx^2} = \frac{C}{K} u_0$$

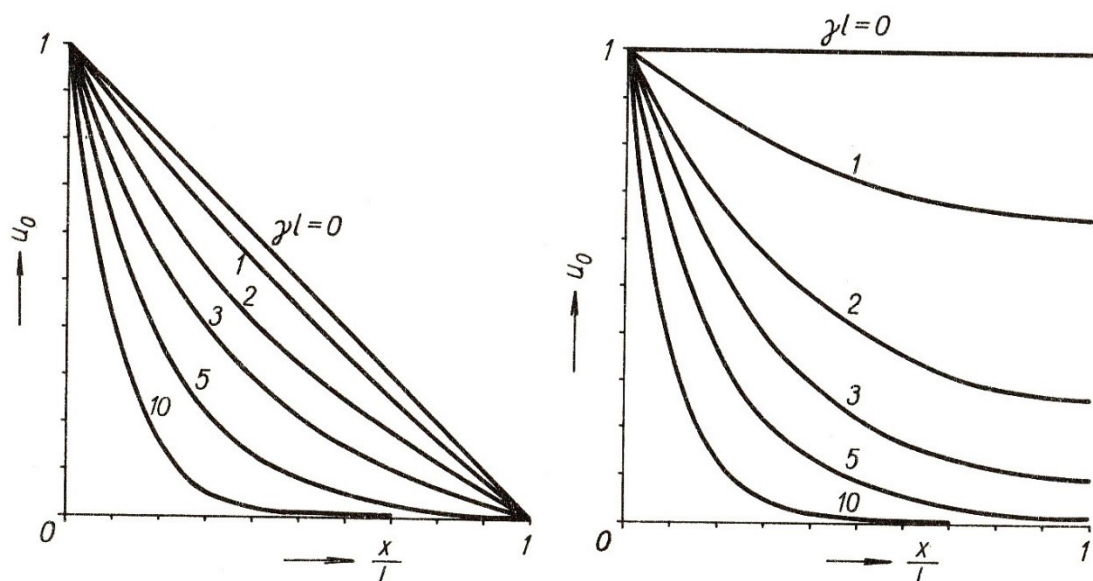
Tato rovnice má řešení ve tvaru

$$u_0 = A_0 e^{\gamma x} + B_0 e^{-\gamma x}$$

Kde

$$\gamma = \sqrt{\frac{C}{K}} \quad 1)$$

Součin  $\gamma l$  výrazně ovlivňuje spád napětí, čím je součin větší, tím je i spád napětí podél délky cívky větší, v teoretickém případě, pokud by byl součin  $\gamma l = 0$ , byl by spád v cívce s uzemněným koncem lineární a v cívce s izolovaným koncem nulový (respektive napětí by mělo konstantní hodnotu podél celé cívky a velikost vstupního impulsu).



Obrázek 2 – Počáteční rozložení napětí pro různé hodnoty  $\gamma l$  cívky s uzemněným koncem (vlevo) a izolovaným koncem (vpravo) [1]

Konstanty  $A_0$  a  $B_0$  určíme z okrajových podmínek. Na vstupní svorce, tedy  $x = 0$ , bude jednotkový ráz napětí

$$u_0 = 1 = A_0 + B_0$$

Konec cívky, tedy  $x = l$ , je uzemněný a v tom případě platí

$$u_0 = 0 = A_0 e^{\gamma l} + B_0 e^{-\gamma l}$$

Dosazením  $A_0, B_0$  a  $\gamma$  získáme rovnici pro počáteční rozložení napětí pro cívku s uzemněným koncem

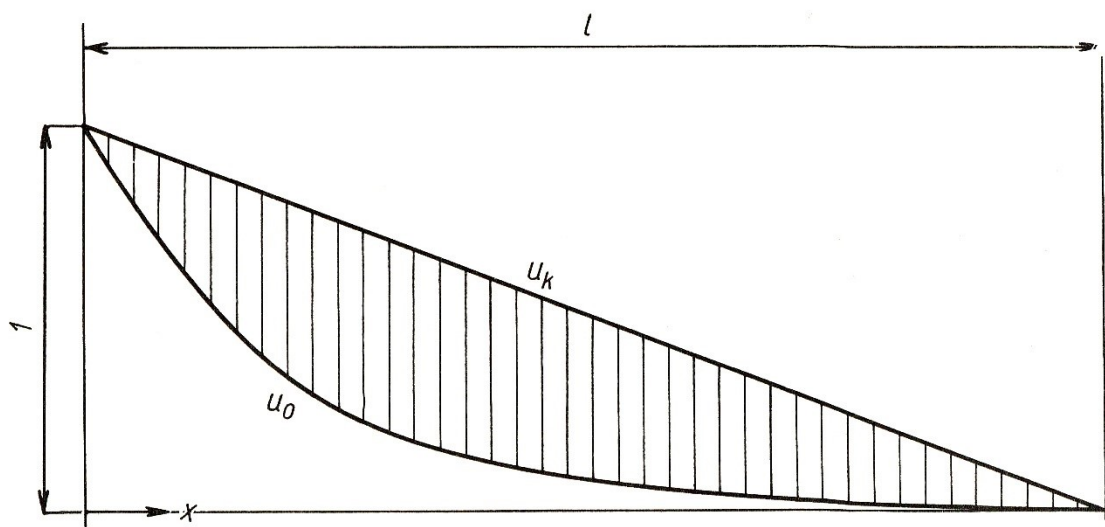
$$u_0 = \frac{\sinh \gamma(l-x)}{\sinh \gamma l} \quad 2)$$

Pro cívku s izolovaným koncem platí okrajové podmínky  $u_0(0) = 1$  a  $i_0(l) = 0$ . Tyto okrajové podmínky lze zapsat jako

$$\left( \frac{du_0}{dx} \right)_{x=l} = 0$$

Počáteční rozložení napětí pro cívku s izolovaným koncem je rovno

$$u_0 = \frac{\cosh \gamma(l-x)}{\cosh \gamma l} \quad 3)$$



Obrázek 3 – Počáteční  $u_0$  a koncové  $u_k$  rozložení napětí [1]

### 1.3 Konečné rozložení napětí cívky [1][2]

V čase  $t \rightarrow \infty$ , čili po nekonečně dlouhé době od objevení se jednotkového pravoúhlého rázu na vstupní svorce nastává tzv. konečné rozložení napětí.

$$\frac{d^2 u_k}{dx^2} = 0$$

Řešením rovnice je

$$u_k = A_k x + B_k$$

Konstanty  $A_0$  a  $B_0$  určíme z okrajových podmínek. Na vstupní svorce, tedy  $x = 0$ , bude jednotkový ráz napětí

$$u_k = 1 = B_k$$

Konec cívky, tedy  $x = l$ , je uzemněný a v tom případě platí

$$u_k = 0 = A_k l + B_k$$

Konečné rozložení napětí pro cívku s uzemněným koncem pak je

$$u_k = 1 - \frac{x}{l} \quad 4)$$

Pro cívku s izolovaným koncem platí

$$u_k = 1$$



#### 1.4 Volné kmity cívky s uzemněným koncem [1][2]

Přechod mezi počátečním a koncovým rozložením napětí je zprostředkován pomocí volných kmitů vinutí.

Obecné řešení volných kmitů napětí dle rovnice

$$u = \sum_n (a_n \cos \alpha_n x + b_n \sin \alpha_n x) \cos \omega_n t$$

kde

$$\omega_n = \frac{\alpha_n}{\sqrt{LC \left(1 + \frac{K}{C} \alpha_n^2\right)}} \quad 5)$$

Užitím okrajové podmínky  $u(0, t) = 0$  získáme

$$a_n = 0$$

Jelikož je konec uzemněný, platí okrajová podmínka  $u(l, t) = 0$  a tím získáme

$$\alpha_n = n \frac{\pi}{l} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Poté volné kmity napětí budou mít tvar

$$u(x, t) = \sum_n b_n \sin \frac{n\pi}{l} x \cos \omega_n t$$

Nyní je nutné určit hodnotu amplitud jednotlivých prostorových harmonických volných kmitů  $b_n$ . Jelikož platí, že součet koncového rozložení napětí a volných kmitů dává počáteční rozložení napětí  $u_0(x, 0) = u_k(x, 0) + u(x, 0)$ , pak volné kmity jsou daný rozdílem počátečního a koncového rozložení napětí

$$\sum_n b_n \sin \frac{n\pi}{l} x = \frac{\sinh \gamma(l-x)}{\sinh \gamma l} - \left(1 - \frac{x}{l}\right)$$

Obě strany rovnice vynásobíme výrazem  $\sin \frac{k\pi}{l} x$ , kde  $k$  je celé číslo a následně integrujeme od 0 do  $l$ , přičemž platí

$$\int_0^l \sin \frac{n\pi}{l} x \sin \frac{k\pi}{l} x \, dx = \begin{cases} 0, & \text{pro } n \neq k \\ \frac{l}{2}, & \text{pro } n = k \end{cases}$$

Pak získáme

$$b_n = -\frac{2}{n\pi} \frac{\gamma^2 l^2}{(n\pi)^2 + \gamma^2 l^2}$$

a výsledné napětí  $u_v$  je

$$u_v(x, t) = u_k(x, t) + u(x, t)$$

$$u_v(x, t) = 1 - \frac{x}{l} + \sum_n b_n \sin \frac{n\pi}{l} x \cos \omega_n t$$

$$u_v(x, t) = 1 - \frac{x}{l} - 2 \sum_n \frac{\gamma^2 l^2}{(n\pi)^2 + \gamma^2 l^2} \frac{\sin \frac{n\pi}{l} x}{n\pi} \cos \omega_n t \quad 6)$$

kde  $n = 1, 2, 3, \dots$

### 1.5 Volné kmity cívky pomocí Carsonovy transformace [1]

Vztah pro volné kmity napětí mezi počátečním a koncovým rozložením napětí můžeme získat řešením rovnice

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + LK \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} = 0$$

pomocí Carsonovy transformace. Vinutí se před příchodem rázového impulsu nachází ve stavu bez energie, pak transformace dává rovnici ( $U$  je obraz napětí  $u$ )

$$\frac{d^2 U}{dx^2} - p^2 LC U + p^2 LK \frac{d^2 U}{dx^2} = 0$$

kterou píšeme ve tvaru

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = \beta^2 U, \text{ kde } \beta^2 = \frac{p^2 LC}{1 + p^2 LK}$$

Řešením této rovnice

$$U = Ae^{\beta x} + Be^{-\beta x}$$

Konstanty  $A$  a  $B$  vychází z okrajových podmínek  $U = 1 = A + B$  pro  $x = 0$ ,  $U = 0 = Ae^{\beta l} + Be^{-\beta l}$  pro  $x = l$  a po jejich výpočtu je dosadíme a získáváme

$$U = \frac{\sinh \beta(l - x)}{\sinh \beta l}$$

což je obraz počátečního rozložení napětí. K tomuto obrazu nyní nalezneme průběh napětí podle rozvinovacího Heavisidova vzorce

$$u(t) = \left[ \frac{\sinh \beta(l - x)}{\sinh \beta l} \right]_{p=0} + \sum_n \frac{[\sinh \beta(l - x)]_{p=p_n}}{p_n \left( \frac{d \sinh \beta l}{dp} \right)_{p=p_n}}$$

kde platí

$$\sinh \beta l = 0 \quad \rightarrow \quad \beta_n = \pm j \frac{n\pi}{l} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$p_{n1,2} = \pm \frac{jn\pi}{l\sqrt{LC\left[1 + \frac{K}{C}\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2\right]}}$$

Pro  $n = 0, \beta_n = 0, p_{n1,2} = 0$

$$\left[\frac{\sinh \beta(l-x)}{\sinh \beta l}\right]_{p=0} = 1 - \frac{x}{l}$$

Čitatel v sumě je možno zapsat

$$\sin \beta_n(l-x) = -\cosh \beta_n l \sinh \beta_n x = \mp j \cos n\pi \sin \frac{n\pi}{l} x$$

Jmenovatel je možno zapsat

$$\left[\frac{d \sinh \beta l}{dp}\right]_{p=p_n} = l \cos n\pi \sqrt{LC} \left[1 + \frac{K}{C}\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}$$

Dosazením těchto 3 výsledku do původní rovnice získáme koncový tvar

$$u_v = 1 - \frac{x}{l} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{l} x}{n \left[1 + \frac{K}{C}\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2\right]} \cos \omega_n t$$

Výsledný vztah počítaný pomocí Carsonovy transformace je identický se vztahem počítaným v předchozí kapitole.

## 1.6 Volné kmity cívky s izolovaným koncem [1][2]

S využitím okrajové podmínky  $\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_{x=l} = 0$ , jsou možné pouze hodnoty

$$\alpha_n = \frac{n\pi}{2l} \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

Volné kmity napětí budou mít tvar

$$u(x, t) = \sum_n b_n \sin \frac{n\pi}{l} x \cos \omega_n t$$

Amplituda  $b_n$  se určí stejně jako u cívky s uzemněným koncem a bude mít tvar

$$b_n = -\frac{4}{n\pi} \frac{\gamma^2 l^2}{\left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 + \gamma^2 l^2}$$

Výsledný vztah pro napětí  $u_v$  je

$$u_v(x, t) = 1 - 4 \sum_n \frac{\gamma^2 l^2}{\left(\frac{n\pi}{2}\right)^2 + \gamma^2 l^2} \frac{\sin \frac{n\pi}{2l} x}{n\pi} \cos \omega_n t \quad 7)$$

kde  $n = 1, 3, 5, \dots$

## 2 Modelování rázových jevů v cívce

Pro zkoumání rázových jevů bude použita jednovrstvá cívka délky 20 cm. Pro zobrazení a srovnání napěťových poměrů budou použity programy ATP a Rázové jevy. Napěťové poměry v cívce během rázového jevu budou rovněž vypočítané manuálně pomocí teoretických vzorců a poté bude následovat srovnání výsledků.

Model v programu ATP se bude skládat ze 300 délkových elementů, což vychází z Wagnerova modelu s rozloženými parametry, který převádí na systém diskrétních hodnot. Bude vyveden každý 10. uzel, což vytváří chybu  $10/300$ , tedy 3,33%, což je přesnost dostatečná pro tvorbu modelu i vynesení grafu rozložení napětí podél délky cívky. Větší množství prvků by zásadní dopad na přesnost simulace nemělo, naopak by se zvýšila komplikovanost obvodu a nároky na délku výpočtu. Pro uzemněný konec cívky se předpokládá maximum v  $1/4$  cívky, proto je nutné sledovat oblast mezi první pětinou a první třetinou cívky. Kvůli optimálnímu počtu elementů pak tyto hodnoty vycházejí na celá čísla dělitelná 5 ( $1/5 = 60$ . element,  $1/4 = 75$ . element,  $1/3 = 100$ . element). Díky programu Rázové jevy byla možnost zjistit předpokládanou oblast výskytu maxima, proto je v modelu v této oblasti vyvedeno celkem 11 po sobě jdoucích vývodů. Pro jiné zadání je možné model snadno upravit.

### 2.1 Parametry cívky

Parametry vycházejí ze zadání samostatného programu „Rázy“, který byl zadán v rámci předmětu Technika vysokého napětí (TVN). Zadání bylo v rámci diplomové práce rozšířeno o činný odpor  $50 \Omega$ .

**Tabulka 1 – Parametry cívky**

veličina	značka	hodnota	jednotka
délka	$l$	0,2	m
odpor	$R$	50	$\Omega$
indukčnost	$L$	1,57	H
příčná kapacita	$C$	95,37	pF
podélná kapacita	$K$	3,59	pF

**Tabulka 2 – Parametry na metr délky**

veličina	značka	hodnota	jednotka
indukčnost	$L_m$	7,85	$H \cdot m^{-1}$
příčná kapacita	$C_m$	476,85	$pF \cdot m^{-1}$
podélná kapacita	$K_m$	0,72	$pf \cdot m$

Pro výpočetní část je nutné znát parametry na metr délky, proto je nutné provést přepočet

$$L_m = \frac{L}{l} = \frac{1,57}{0,2} = 7,85 \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$C_m = \frac{C}{l} = \frac{95,37 \cdot 10^{-12}}{0,2} = 476,85 \text{ pF} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$K_m = K \cdot l = 3,59 \cdot 10^{-12} \cdot 0,2 = 0,72 \text{ pf} \cdot \text{m}$$

Jelikož se bude model cívky v programu ATP skládat ze 300 elementů, je nutné vypočítat parametry pro jeden délkový element

**Tabulka 3 – Parametry pro jeden délkový element**

veličina	značka	hodnota	jednotka
délka	$l_1$	0,666	mm
odpor	$R_1$	0,167	$\Omega$
indukčnost	$L_1$	5,23	mH
příčná kapacita	$C_1$	$3,179 \cdot 10^{-7}$	$\mu\text{F}$
podélná kapacita	$K_1$	$1,077 \cdot 10^{-3}$	$\mu\text{F}$

$$l_1 = \frac{l}{300} = \frac{0,2}{300} = 6,66 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,666 \text{ mm}$$

$$R_1 = \frac{R}{300} = \frac{50}{300} = 0,167 \Omega$$

$$L_1 = \frac{L}{300} = \frac{1,57}{300} = 5,23 \cdot 10^{-3} \text{ H} = 5,23 \text{ mH}$$

$$C_1 = \frac{C}{300} = \frac{95,37 \cdot 10^{-12}}{300} = 3,179 \cdot 10^{-13} \text{ F} = 3,179 \cdot 10^{-7} \mu\text{F}$$

$$K_1 = K \cdot 300 = 3,59 \cdot 10^{-12} \cdot 300 = 1,077 \cdot 10^{-9} \text{ F} = 1,077 \cdot 10^{-3} \mu\text{F}$$

Maximální doba periody:

a) Uzemněný konec cívky

$$T_U = 2l \sqrt{LC \left(1 + \frac{K}{C} \cdot \left(\frac{\pi}{l}\right)^2\right)}$$

$$T_U = 2 \cdot 0,2 \sqrt{7,85 \cdot 476,85 \cdot 10^{-12} \left(1 + \frac{0,72 \cdot 10^{-12}}{476,85 \cdot 10^{-12}} \cdot \left(\frac{\pi}{0,2}\right)^2\right)} = 28,66 \mu s$$

b) Izolovaný konec cívky

$$T_I = 4l \sqrt{LC \left(1 + \frac{K}{C} \cdot \left(\frac{\pi}{2l}\right)^2\right)}$$

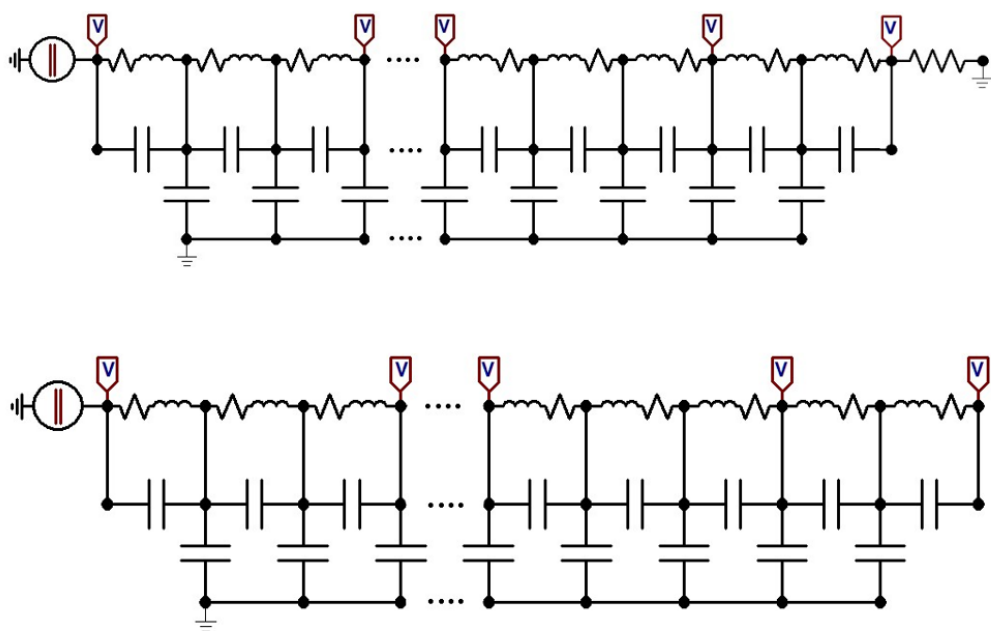
$$T_I = 4 \cdot 0,2 \sqrt{7,85 \cdot 476,85 \cdot 10^{-12} \left(1 + \frac{0,72 \cdot 10^{-12}}{476,85 \cdot 10^{-12}} \cdot \left(\frac{\pi}{2 \cdot 0,2}\right)^2\right)} = 51,16 \mu s$$

Mezní frekvence:

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{LK}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{7,85 \cdot 0,72 \cdot 10^{-12}}} = 67,1 \text{ kHz}$$

## 2.2 Model v programu ATP

V prvním případě byl sestaven model pro testovací účel, který se skládal pouze z kapacit a indukčností, avšak pro co nejrealističtější výsledky byl přidán i rezistor. Výsledný element se skládá ze sériové kombinace rezistoru a cívky, které reprezentují činný odpor  $R$  a indukčnost  $L$  vodiče. Paralelně je zapojena podélná kapacita  $K$  charakterizující kapacitu mezi jednotlivými závity cívky. Každý element je rovněž charakterizován kapacitou vůči zemi  $C$ . Potenciál země je vytvořen jako jeden uzemněný uzel spojený podél celé cívky. Celkový počet délkových elementů tvořících cívku je 300. Pro simulaci cívky s uzemněným koncem je nutné konec cívky uzemnit přes odpor  $R = 1 \text{ m}\Omega$ , který je dostatečně malý proto, aby podstatně neovlivnil simulaci a zároveň zajistí správnou funkčnost programu tak, aby nedošlo k matematickým oscilacím ani k výskytu chybové zprávy při výpočtu.



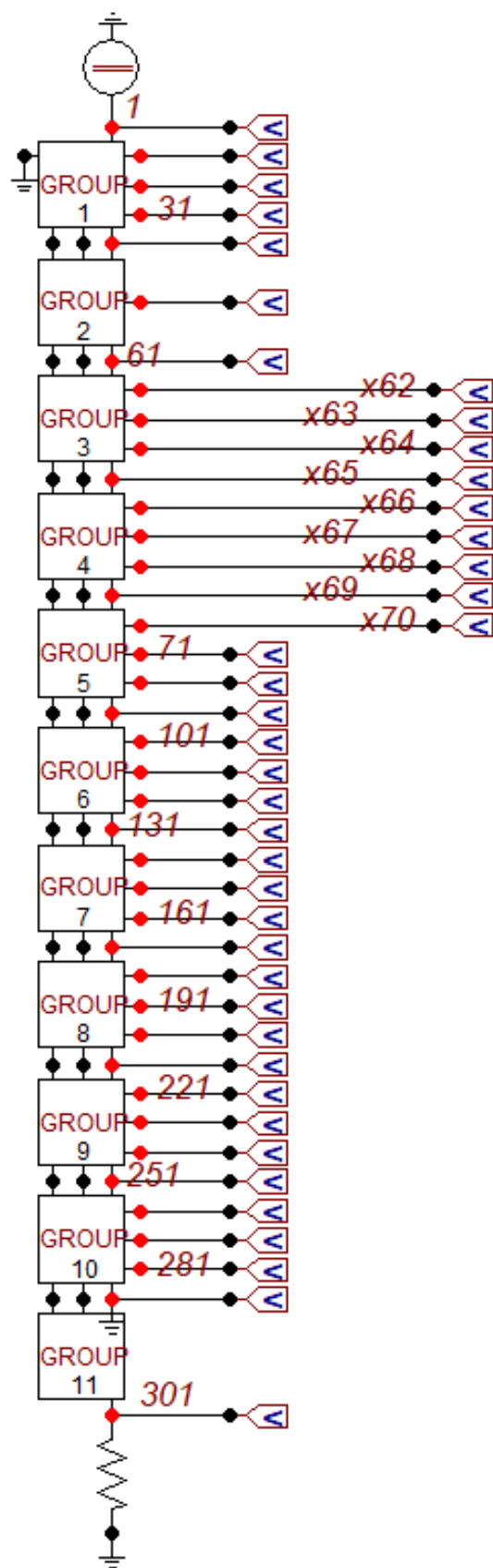
Obrázek 4 – Schéma cívky s uzemněným koncem (nahore) a s izolovaným koncem (dole) v programu ATP

Zdrojem rázového jevu je stejnosměrný zdroj napětí reprezentovaný prvkem v kategorii Sources – DC type 11. Velikost amplitudy napětí je nastavena na 1 V, parametr Tstart na hodnotu -1 s, jelikož chceme, aby zdroj byl zapnutý již před započítím simulace. Parametr Tstop již příliš podstatný není, protože nás zajímají první okamžiky přechodového děje, který probíhá v řádech milisekund, proto jej ponecháme na hodnotě 1000 s.

Pro lepší orientaci v obvodu je nutné zkomprimovat obvodové prvky to tzv. skupiny (Group). Je nutné pouze vyvést uzly pro napěťové sondy, aby bylo možno měřit napětí v různých místech cívky, jelikož po seskupení by byly uzly schované a nebyl by k nim přístup.

Celé schéma se skládá z 11 skupin. První skupina je napojena na zdroj napětí a poslední, jedenáctá skupina, reprezentuje konec cívky, který provozujeme jako izolovaný nebo uzemněný přes malý odpor. Každý desátý uzel je vyveden ze skupiny ven, aby k němu bylo možno připojit napěťovou sondu. Nicméně přibližně v první čtvrtině cívky, kde pro cívku s uzemněným koncem čekáme přepětí až 150 %, je vyvedený každý uzel, aby bylo možné zjistit, na kterém elementu k maximálnímu přepětí došlo a tento element dále zkoumat a porovnávat. Schéma je takto kompletní a je možné jej celé seskupit do jedné skupiny a použít jako jednu fázi vinutí transformátoru pro další výpočty. Izolovaný konec má své napěťové maximum na konci a může dosáhnout až 280 % vstupního napětí.

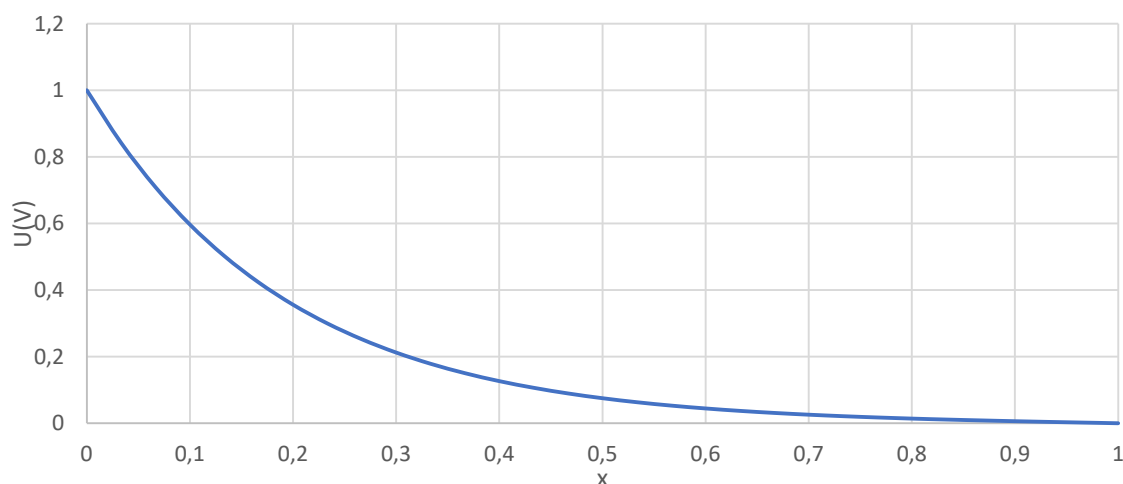




Obrázek 5 – Schéma cívky po provedeném seskupení

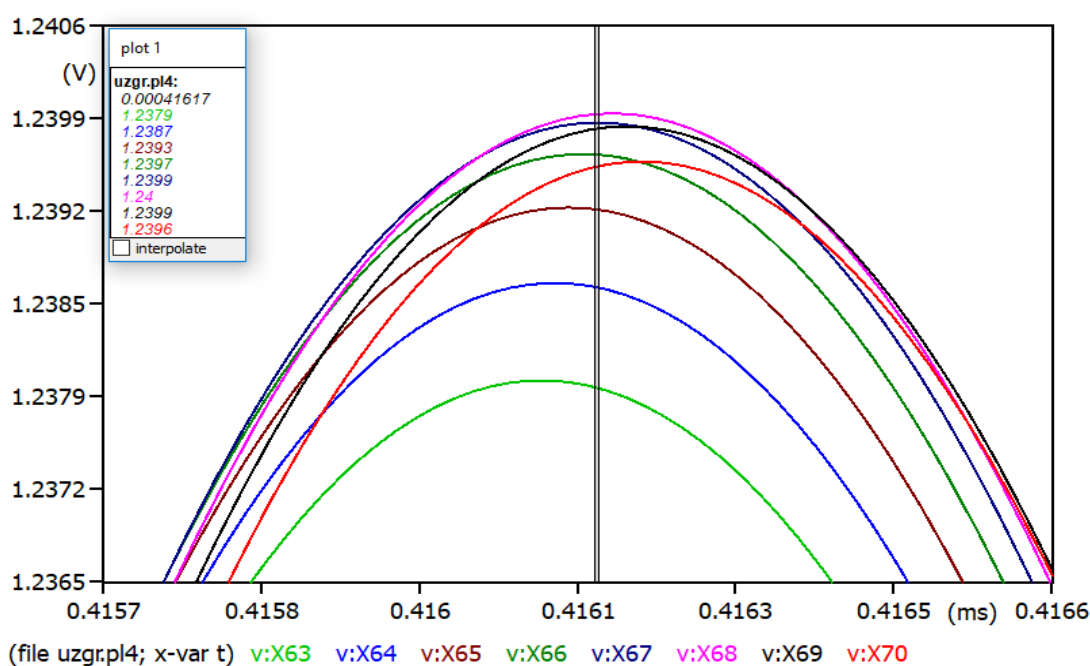
### 2.3 Měření rázových jevů v uzemněné cívce pomocí programu ATP

Vytvoření grafu počátečního rozložení napětí přímo program ATP neumožňuje. Proto je nutné v počátečním čase získat hodnoty pro každý měřený uzel a následně graf vytvořit pomocí programu Microsoft Excel.



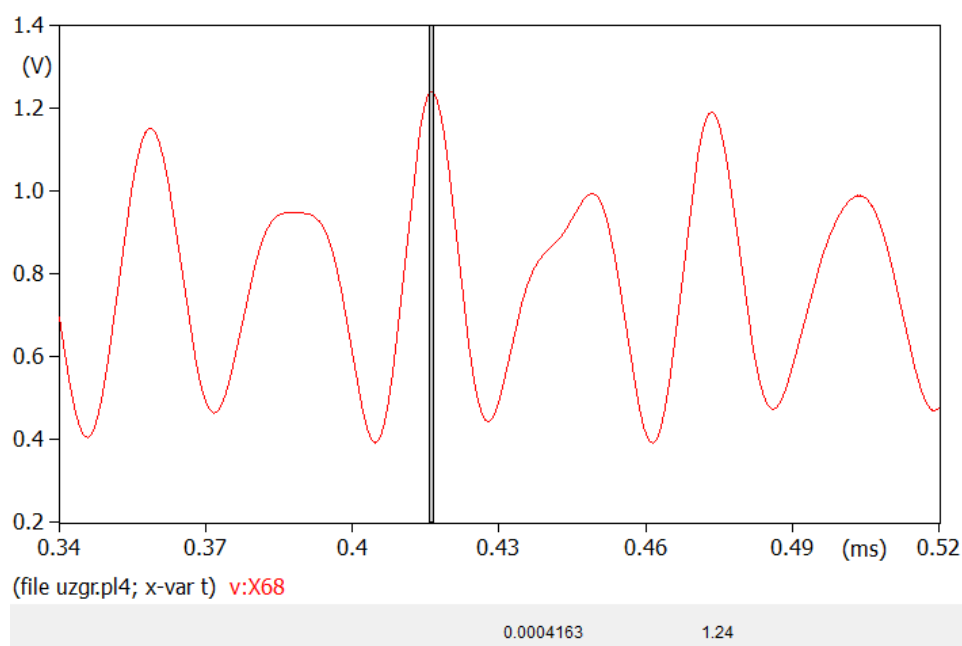
Obrázek 6 – Graf počátečního rozložení napětí cívky s uzemněným koncem z dat programu ATP

Maximální přepětí v cívce s uzemněným koncem očekáváme v první čtvrtině cívky, což odpovídá přibližně 75. uzlu. V obvodu jsou v oblasti první čtvrtiny vyvedeny všechny uzly. Následně je potřeba vykreslit časové průběhy napětí na těchto uzlech a zjistit, na kterém z nich je maximální napětí, tento uzel je hledaným místem největšího přepětí v cívce.



Obrázek 7 - Časové průběhy napětí uzlech v  $\frac{1}{4}$  cívky

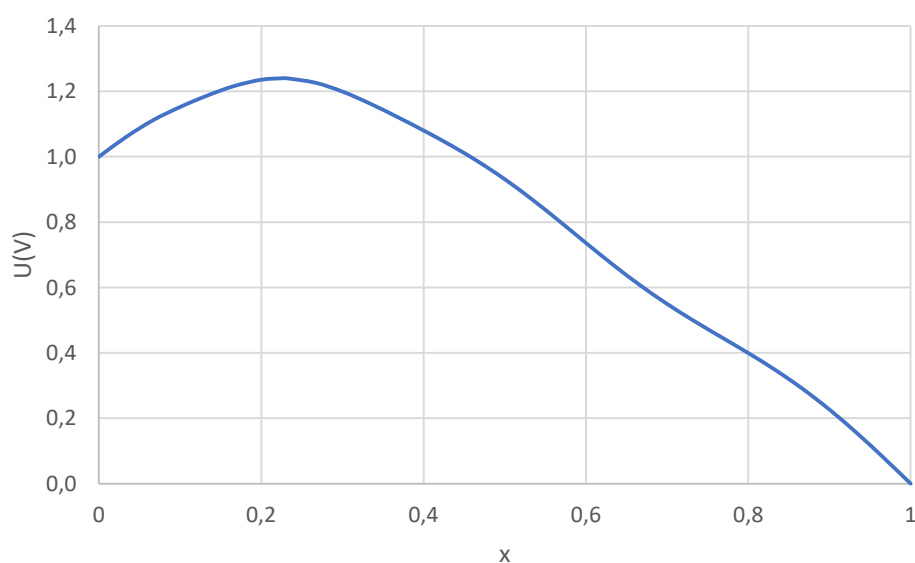
Z časových průběhů napětí (viz Obrázek 7) je patrné, že největší přepětí bylo na 68. uzlu. Časový průběh napětí v tomto uzlu vypadá v oblasti maxima



Obrázek 8 – Časový průběh napětí v 68. uzlu cívky v oblasti maxima

Z grafu (viz Obrázek 8) vykresleném pomocí PlotXY je patrné, že dosažené maximum napětí je  $U = 1,24 \text{ V}$  a bylo jej dosaženo v čase  $t = 416,3 \text{ } \mu\text{s}$ .

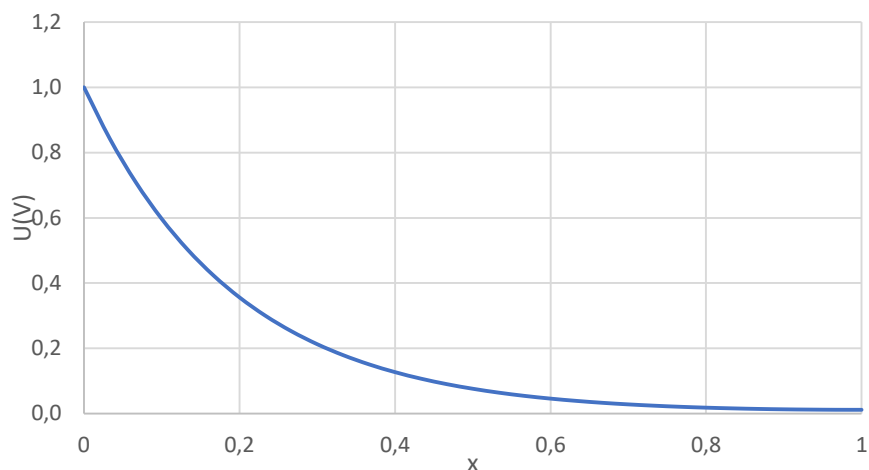
Jelikož je nám známý čas napětíového maxima, je možné vykreslit rozložení napětí podél cívky v tomto čase i na ostatních prvcích (opět stejnou metodou, jako počáteční rozložení napětí)



Obrázek 9 – Rozložení napětí podél cívky v čase maximálního přepětí

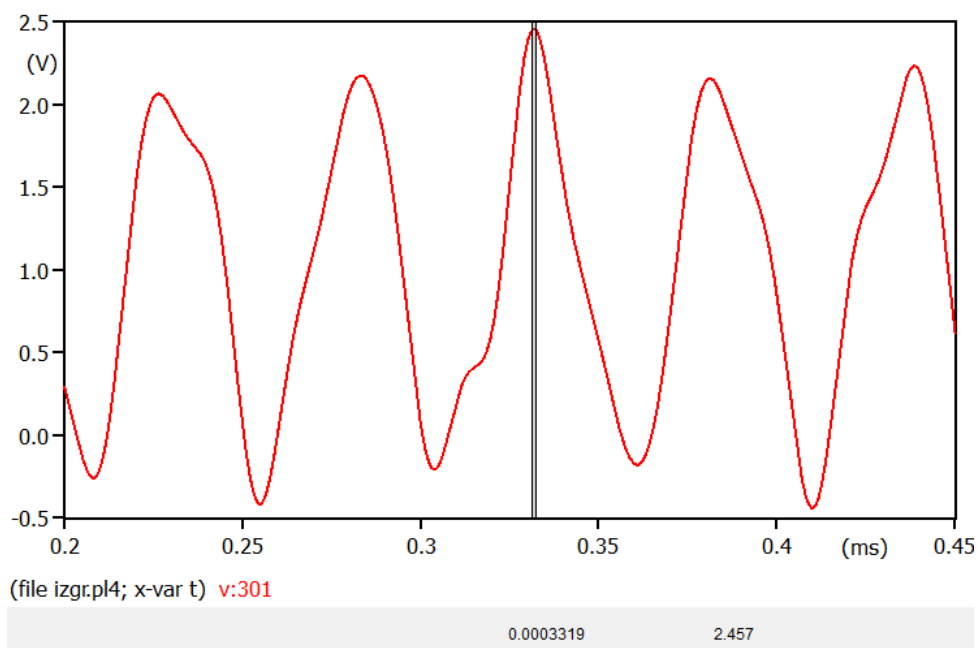
## 2.4 Měření rázových jevů v izolované cívce pomocí programu ATP

Počáteční rozložení napětí získáme stejným způsobem, jako u cívky s uzemněným koncem (export dat z ATP a tvorba grafu v Microsoft Excel)



Obrázek 10 – Počáteční rozložení napětí cívky s izolovaným koncem z dat ATP

Maximální přepětí se objeví na izolovaném konci, proto je důležité zobrazit časový průběh, aby bylo zřejmé, jaké hodnoty dosahuje a v jakém čase

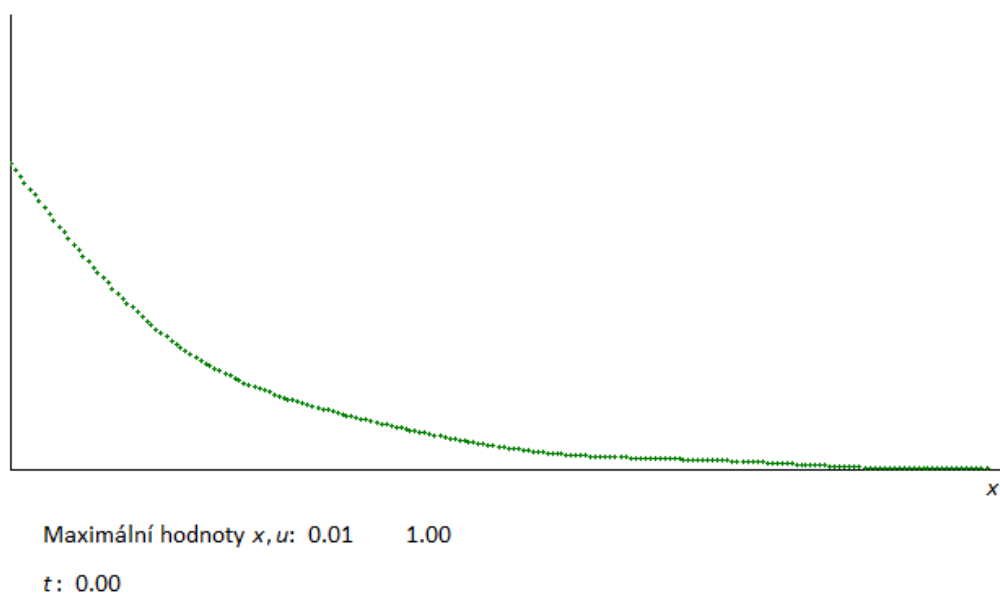


Obrázek 11 – Časový průběh napětí na izolovaném konci cívky z ATP

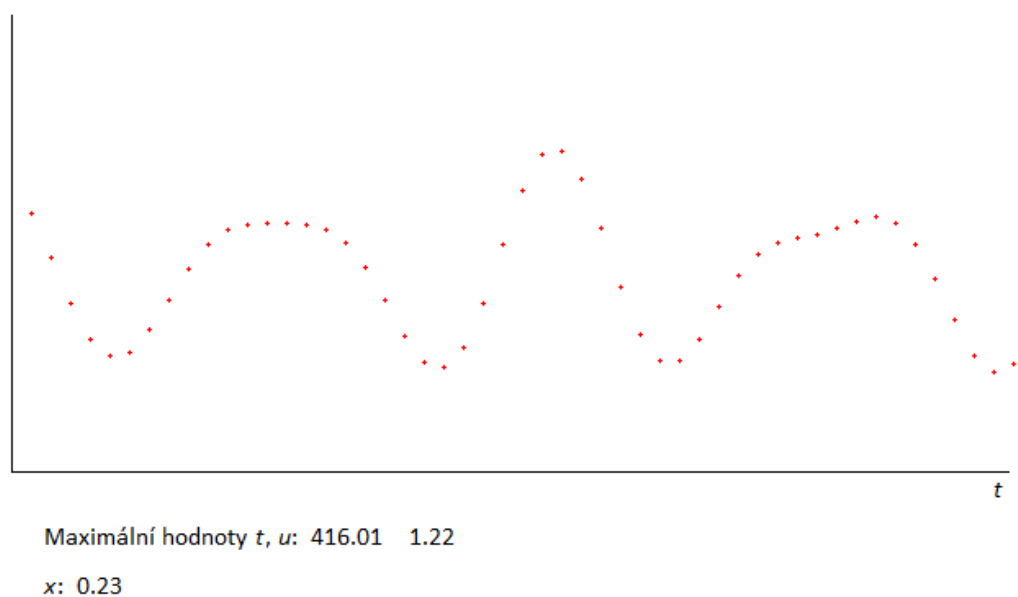
Maximálního přepětí bylo dosaženo v čase  $t = 331,9 \mu\text{s}$  a dosáhlo hodnoty  $U = 2,457 \text{ V}$ .

## 2.5 Měření rázových jevů v cívce pomocí programu Rázové jevy

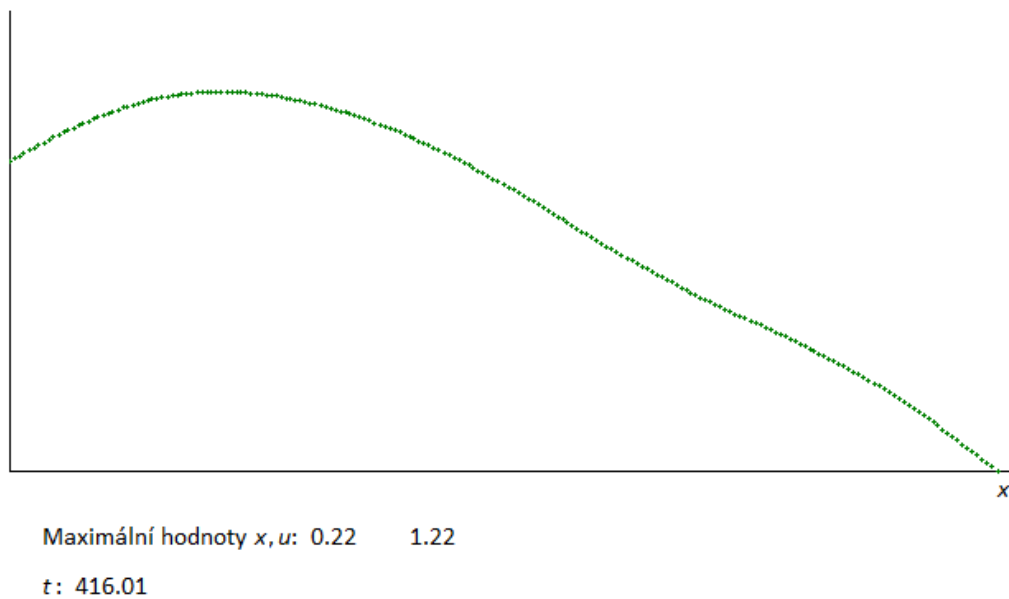
Program Rázové jevy vytvořený Davidem Juchou umožňuje sledovat rozložení napětí a časové průběhy napětí během rázového jevu. Program má vlastní rozhraní, ve kterém je zapotřebí vyplnit pouze parametry cívky  $L$ ,  $C$ ,  $K$ , zvolit zda sledovat časový průběh nebo rozložení napětí a program následně vykreslí požadovaný graf. Pro hledání maxima napětí vystačí prvních 20 period průběhu, jelikož poté by se v reálné situaci začalo projevovat tlumení.



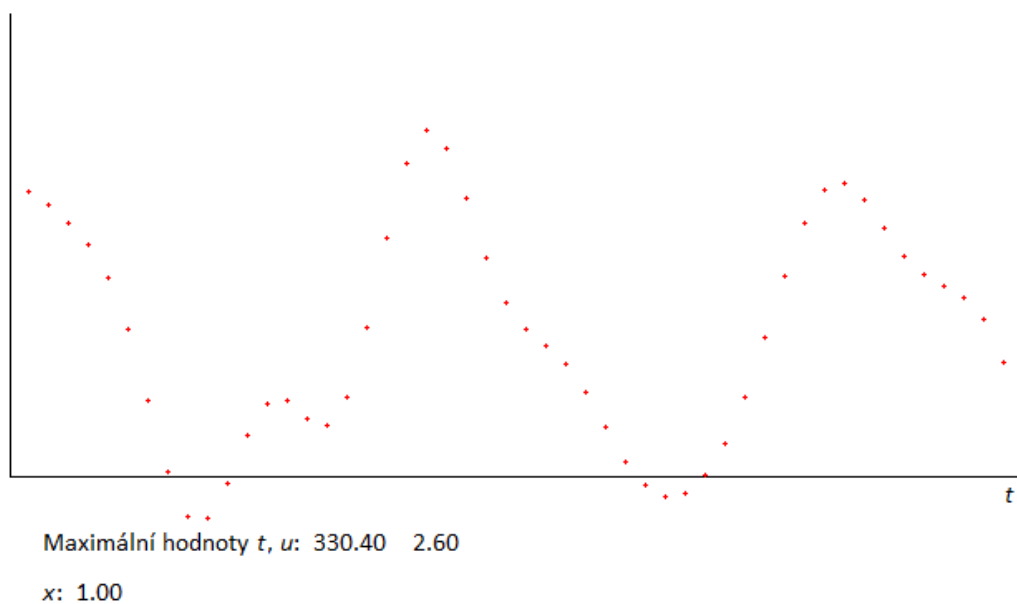
Obrázek 12 – Počáteční rozložení napětí cívky s uzemněným koncem pomocí Rázové jevy



Obrázek 13 – Časový průběh napětí cívky s uzemněným koncem v místě maximálního přepětí



Obrázek 14 - Rozložení napětí cívky s uzemněným koncem pomocí Rázové jevy v čase maximálního přepětí



Obrázek 15 - Časový průběh napětí cívky s izolovaným koncem na konci cívky

## 2.6 Výpočet rázových jevů v uzemněné cívce pomocí výpočtu

Výpočet napěťových poměrů v cívce je možné uskutečnit také manuálním výpočtem pomocí vzorců. K výpočtu velkého množství hodnot jsem využil Microsoft Excel 2016. Právě pro výpočet je nutné převést parametry cívky  $L$ ,  $C$ ,  $K$  na parametry na metr délky.

Jelikož je v programu ATP vyveden každý desátý uzel, je nutné spočítat vzdálenost  $x$  od začátku cívky ke každému uzlu, jelikož právě v každém desátém uzlu je potřeba vypočítat velikost napětí. Výsledné grafy tak budou zhotoveny ze 30 hodnot.

$$x = \frac{l}{30} = \frac{0,2}{30} = 6,67 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Následně je nutné vypočítat konstantu gamma (1), která je důležitá jak pro výpočet počátečního rozložení napětí, tak i pro výpočet napětí v kterémkoli uzlu

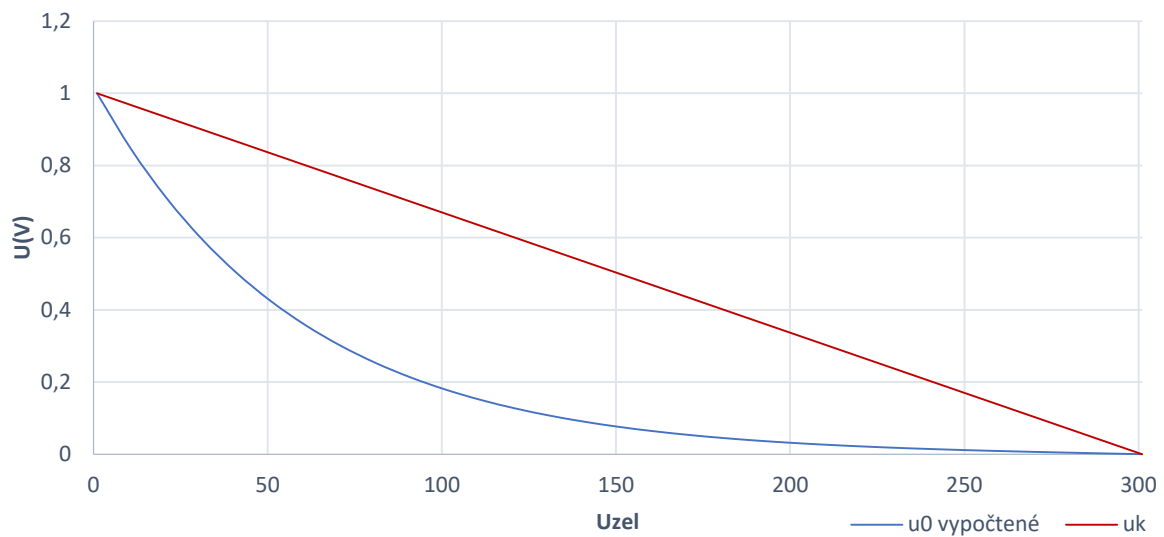
$$\gamma = \sqrt{\frac{C_m}{K_m}} = \sqrt{\frac{4,77 \cdot 10^{-10}}{7,18 \cdot 10^{-13}}} = 25,77$$

Počáteční rozložení napětí (2) je rovno podílu hyperbolických sinů, kde v čitateli je součin  $\gamma$  a rozdíl celkové délky a vzdálenosti od počátku cívky k uzlu. Ve jmenovateli je pak za hyperbolickým sinem součin  $\gamma$  a celkové délky. Uvedený příklad uvádí výpočet pro 11. uzel ( $x = 6,67 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ).

$$u_0 = \frac{\sinh \gamma(l - x)}{\sinh \gamma l} = \frac{\sinh 25,77(0,2 - 6,67 \cdot 10^{-3})}{\sinh 25,77 \cdot 0,2} = 0,842 \text{ V}$$

Konečné rozložení napětí (4) se potom vypočte jako poměr celkové délky ku délce k uzlu, a to celé se odečte od 1, což musí dát lineární funkci se zápornou směrnici

$$u_k = 1 - \frac{x}{l} = 1 - \frac{6,67 \cdot 10^{-3}}{0,2} = 0,967 \text{ V}$$



Obrázek 16 – Počáteční a koncové rozložení napětí cívky s uzemněným koncem

Abychom mohli zobrazit rozložení napětí podél cívky, musíme určit čas, ve kterém maximum nastane. Maximální přepětí nastane na 68. elementu, proto je nutné určit časový průběh napětí na 68. prvku a určit čas maximálního přepětí.

Vzdálenost od začátku cívky k 68. uzlu je

$$x(68) = \frac{l}{300} \cdot 68 = \frac{0,2}{300} \cdot 68 = 45,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Nezbytným parametrem pro výpočet je úhlová frekvence (5) (pro příklad je uveden výpočet pro 1. harmonickou)

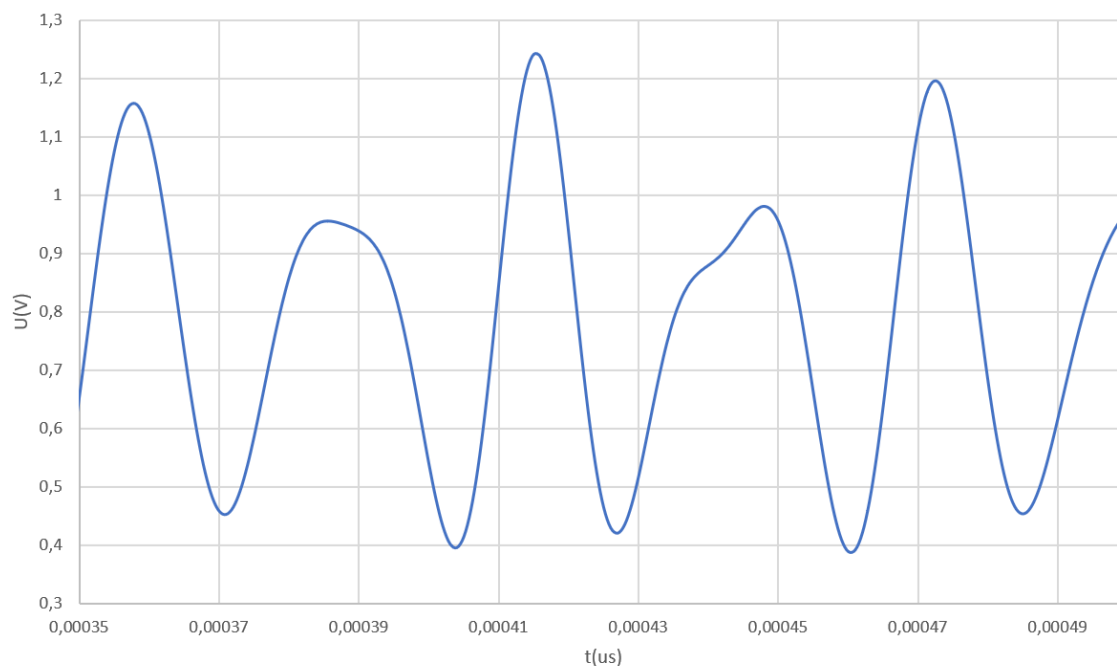
$$\alpha_1 = n \frac{\pi}{l} = 1 \frac{\pi}{0,2} = 15,71$$

$$\omega_1 = \frac{\alpha_n}{\sqrt{L_m C_m \left(1 + \frac{K_m}{C_m} \alpha_n^2\right)}} = \frac{15,71}{\sqrt{7,85 \cdot 4,77 \cdot 10^{-10} \left(1 + \frac{7,18 \cdot 10^{-13}}{4,77 \cdot 10^{-10}} \cdot 15,71^2\right)}} = 2,19 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$$

Následně se vypočítá  $u_v(x, t)$  pro  $t \in (0; 500) \mu\text{s}$  a určíme čas, kdy nastane maximum. Ve vzorci (6) je v sumě uvedený součet příspěvků všech volných kmitů. Pro velkou přesnost jsem použil součet prvních 1000 harmonických

$$u_v(45,3 \cdot 10^{-3}, t) = 1 - \frac{x}{l} - 2 \sum_{1000} \frac{\gamma^2 l^2}{(n\pi)^2 + \gamma^2 l^2} \frac{\sin \frac{n\pi}{l} x}{n\pi} \cos \omega_n t$$



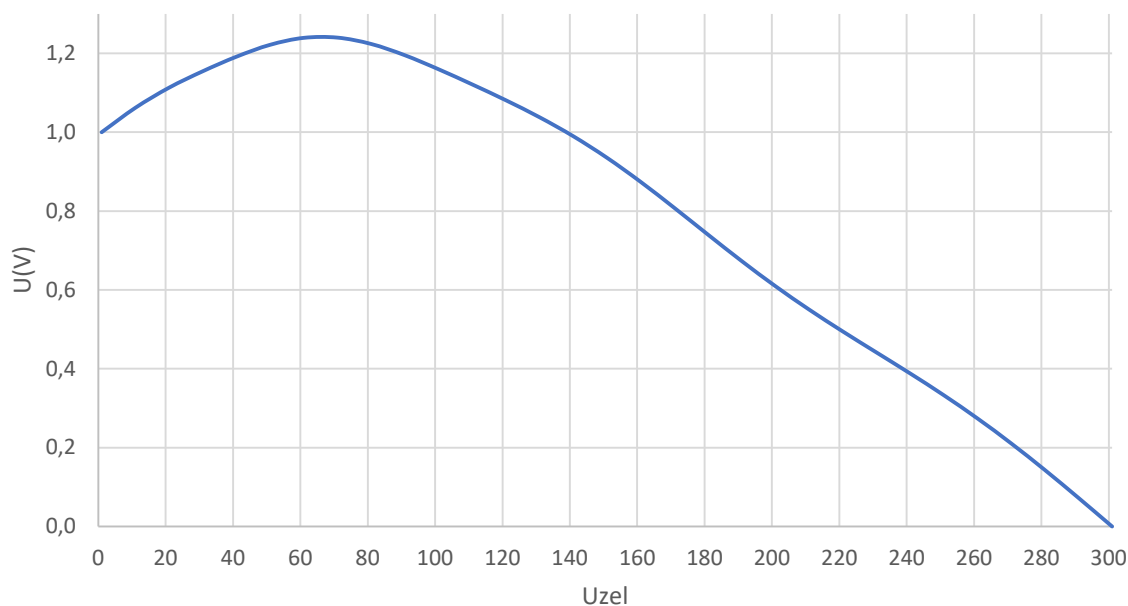


Obrázek 17 – Časový průběh napětí v uzlu 68

Dle grafu je patrné, že maximální hodnoty  $U = 1,241 \text{ V}$  bylo dosaženo v čase  $t = 415 \text{ } \mu\text{s}$ . Nyní je možné zobrazit rozložení napětí  $u_v(x, t)$  podél celé cívky v čase, kdy nastalo maximální možné přepětí, tedy  $415 \text{ } \mu\text{s}$ .

$$u_v(x, 415 \cdot 10^{-6}) = 1 - \frac{x}{l} - 2 \sum_{1000} \frac{\gamma^2 l^2}{(n\pi)^2 + \gamma^2 l^2} \frac{\sin \frac{n\pi}{l} x}{n\pi} \cos \omega_n t$$

Z vypočtených hodnot zobrazených v grafu je patrné, že maximální přepětí je opravdu v 68. uzlu ve vzdálenosti  $x(68) = 45,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ . Z těchto faktů vyplývá, že při jednotkovém skoku  $1 \text{ V}$ , získáme 124 % přepětí.



Obrázek 18 – Rozložení napětí podél cívky s uzemněným koncem

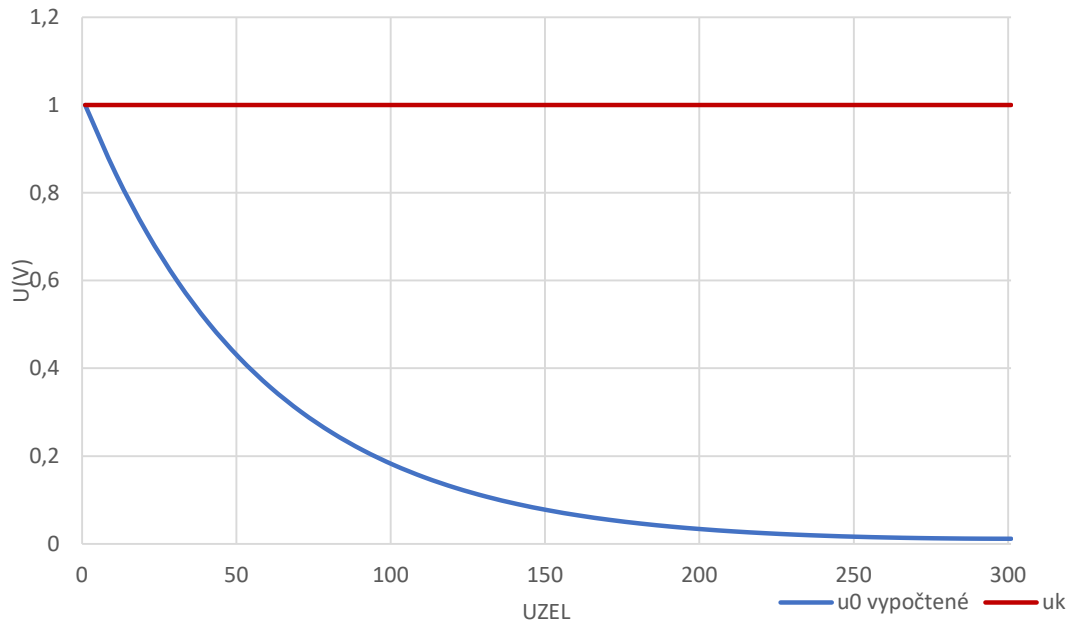
## 2.7 Výpočet rázových jevů v izolované cívce pomocí výpočtu

Počáteční rozložení napětí (3) je rovno podílu hyperbolických cosinů, kde v čitateli je součin  $\gamma$  a rozdíl celkové délky a vzdálenosti od počátku cívky k uzlu. Ve jmenovateli je pak za hyperbolickým cosinem součin  $\gamma$  a celkové délky. Uvedený příklad uvádí výpočet pro 11. uzel ( $x = 6,67 \cdot 10^{-3}$  m).

$$u_0 = \frac{\cosh \gamma(l - x)}{\cosh \gamma l} = \frac{\cosh 25,77(0,2 - 6,67 \cdot 10^{-3})}{\cosh 25,77 \cdot 0,2} = 0,842 \text{ V}$$

Jelikož je konec izolovaný, nedochází k žádnému postupnému poklesu napětí až k potenciálu země na posledním uzlu jako u cívky s uzemněným koncem, ale napětí je konstantní podél celé cívky

$$u_k = 1 \text{ V}$$



Obrázek 19 - Počáteční a koncové rozložení napětí cívky s izolovaným koncem

Maximální přepětí nastane na samotném konci cívky tedy v 301. uzlu. Z tohoto důvodu je potřeba vykreslit časový průběh napětí v 301. uzlu a z něj poté určit čas maximálního přepětí.

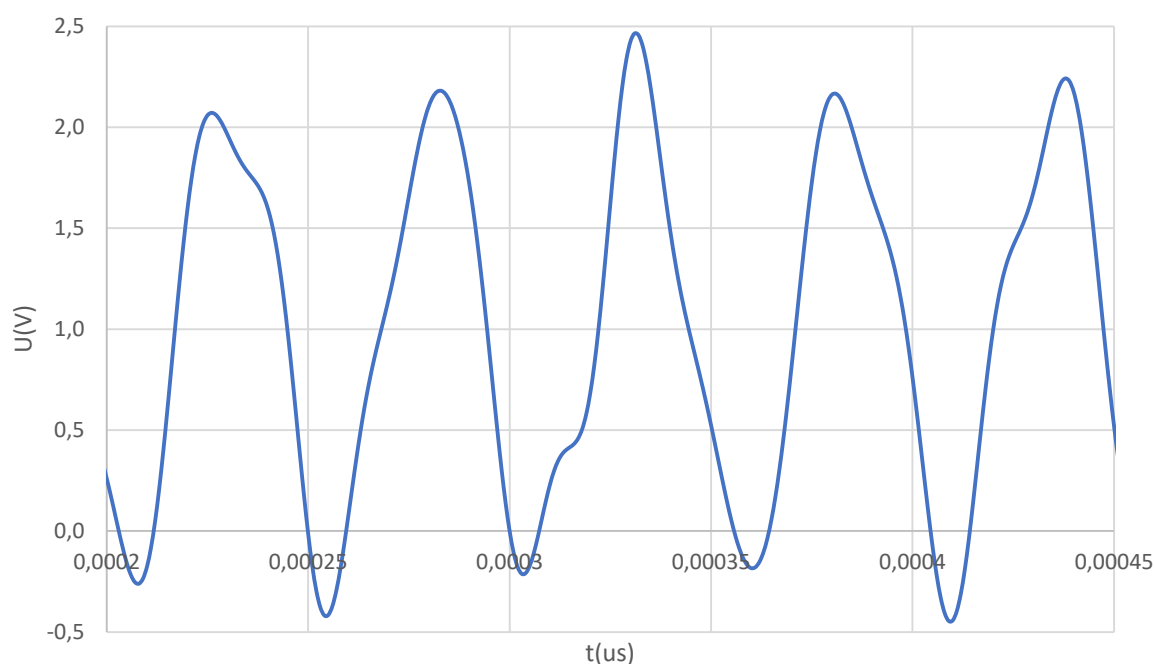
Vztah pro výpočet úhlové frekvence (5) zůstává stejný jako u cívky s uzemněným koncem, avšak parametr alfa je poloviční a pro jeho výpočet se počítá pouze s lichými harmonickými, teda  $n = 1, 3, 5, \dots$  (příklad výpočtu je opět uveden pro 1. volný kmit)

$$\alpha_1 = \frac{n\pi}{2l} = \frac{1 \cdot \pi}{2 \cdot 0,2} = 7,85$$

$$\omega_1 = \frac{\alpha_n}{\sqrt{L_m C_m \left(1 + \frac{K_m}{C_m} \alpha_n^2\right)}} = \frac{7,85}{\sqrt{7,85 \cdot 4,77 \cdot 10^{-10} \left(1 + \frac{7,18 \cdot 10^{-13}}{4,77 \cdot 10^{-10}} \cdot 7,85^2\right)}} = 1,23 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$$

Následně se vypočítá  $u_v(x, t)$  pro  $t \in (0; 500) \mu\text{s}$  a určíme čas kdy nastane maximum. Ve vzorci (7) je v sumě uvedený součet příspěvků všech volných kmitů. Pro velkou přesnost jsem použil součet všech lichých harmonických do  $n = 999$ .

$$u_v(l, t) = 1 - 4 \sum_n \frac{\gamma^2 l^2}{\left(\frac{n\pi}{2}\right)^2 + \gamma^2 l^2} \frac{\sin \frac{n\pi}{2l} x}{n\pi} \cos \omega_n t$$



Obrázek 20 - Časový průběh napětí na izolovaném konci cívky

Z grafu je patrné, že maximální hodnoty  $U = 2,464 \text{ V}$  bylo dosaženo v čase  $t = 331 \text{ μs}$ .

## 2.8 Srovnání výsledků

Srovnání jednotlivých způsobů výpočtu spočívá v porovnání maximálního přepětí, kterého bylo dosaženo, času, ve kterém nastalo maximální přepětí a vzdálenost od počátku cívky. Jako konvenčně pravá hodnota pro výpočet odchylek bude uvažována hodnota získána z teoretických vzorců pomocí Microsoft Excel.

Tabulka 4 – Srovnání výsledků pro cívku s uzemněným a izolovaným koncem

Program (metoda výpočtu)	Uzemněný konec			Izolovaný konec		
	$U_{\max} [\text{V}]$	$t [\mu\text{s}]$	$x [-]$	$U_{\max} [\text{V}]$	$t [\mu\text{s}]$	$x [-]$
ATP	1,240	416,3	0,23	2,457	331,9	1
Rázové jevy	1,220	416,1	0,23	2,600	330,4	1
Microsoft Excel	1,241	415,0	0,23	2,460	331,0	1

Absolutní chyba se vypočte jako rozdíl hodnoty změřené a hodnoty skutečné (v tomto případě se jedná o hodnotu konvenčně pravou vypočtenou pomocí Microsoft Excel). Relativní chyba je rovna podílu absolutní chyby a skutečné hodnoty veličiny. Příklad výpočtu je uveden pro cívku s uzemněným koncem a počítanou pomocí programu ATP.

$$\Delta_U = U_{ATP} - U_{skutečná} = 1,24 - 1,241 = 0,001 \text{ V}$$

$$\delta_U = \frac{\Delta_U}{U_{skutečná}} \cdot 100 = \frac{0,001}{1,241} \cdot 100 = 0,08 \%$$

$$\Delta_t = t_{ATP} - t_{skutečná} = 416,3 - 415,0 = 1,3 \text{ } \mu\text{s}$$

$$\delta_t = \frac{\Delta_t}{t_{skutečná}} \cdot 100 = \frac{1,3}{415,0} \cdot 100 = 0,31 \%$$

**Tabulka 5 - Absolutní a relativní odchylka**

Program (metoda výpočtu)	Uzemněný konec				Izolovaný konec			
	$\Delta_U$ [V]	$\delta_U$ [%]	$\Delta_t$ [ $\mu$ s]	$\delta_t$ [%]	$\Delta_U$ [V]	$\delta_U$ [%]	$\Delta_t$ [ $\mu$ s]	$\delta_t$ [%]
ATP	0,001	0,08	1,3	0,31	0,003	0,12	0,9	0,27
Rázové jevy	0,021	1,69	1,1	0,27	0,14	5,69	0,6	0,18

Odchylka maximálního přepětí byla v obou případech, tedy jak pro uzemněný, tak pro izolovaný konec, menší v případě programu ATP. Relativní hodnota odchylky dosahuje pouhých setin procenta oproti hodnotám vycházejících z teoretických vzorců. Oproti tomu program Rázové jevy dosáhl odchylky větší, přesně 1,69 % pro uzemněný konec cívky a dokonce 5,69 % pro případ izolovaného konce cívky. Hlavním nedostatkem programu Rázové jevy je, že uvažuje pouze prvních 5 harmonických. V případě, že je nutné určit, který kmit dosáhl nejvyšší hodnoty, je počet vyšších harmonických kmitů zahrnutých do výpočtu podstatný, jelikož i drobné hodnoty ve velkém počtu vyšších harmonických mohou ovlivnit výsledek. Je však nutno podotknout, že odchylka kolem 6 % je velmi malá a nemá zásadní vliv na výsledek.

Rázové jevy ani výpočet pomocí MS Excel ve svém výpočtu nezahrnují činný odpor, který způsobuje tlumení. Význam činného odporu v prvních periodách rázového jevu není příliš významný, jelikož průběhy z ATP (s odporem), z programu Rázové jevy (bez odporu) a výpočtu pomocí vzorců (bez odporu) se shodují s minimální odchylkou. Tlumení se projevuje až v delších časových úsecích v řádech desítek milisekund.

Což se týče odchylky času, ve kterém nastalo maximální přepětí, byl přesnější program Rázové jevy. Odchylka však v obou případech dosahovala zanedbatelné hodnoty do půl procenta.

### 3 Modelování rázových jevů v distribuční soustavě

Rázové jevy v distribuční soustavě jsou nejčastěji způsobeny atmosférickými výboji. Při úderu blesku do vedení dochází k šíření přímé vlny po vedení od místa zásahu ke konci vedení, kde dochází k jejímu odrazu a šíření vlny zpětné. Pokud se uvažuje vedení ztrátové, potom činitel útlumu  $\alpha \neq 0$  a vedení je krom indukčnosti  $L_K$  a kapacity  $C_K$  charakterizováno také činným odporem  $R_K$  a vodivostí  $G_K$ , které způsobí útlum amplitudy vlny. V případě obecné zátěže na konci vedení dochází k odrazu vlny na konci vedení a míru tohoto odrazu charakterizuje činitel odrazu  $\rho$ . V případě, že by vedení bylo zatížené vlnovou impedancí  $Z_V$  (stav kdy se přenáší tzv. přirozený výkon  $S_p$ ), na vedení bude pouze přímá vlna a k odrazu nedojde. Jedná se o tzv. přizpůsobené vedení. [4]

Rázové jevy způsobují obrovská přepětí, která způsobují poškození (nebo úplné zničení) izolace, rychlejší stárnutí izolace a tím vzniká i nebezpečí průrazu a následného zkratu. V transformátorech budou nejvíce namáhány vstupní závity cívek, toto namáhání se dá kompenzovat pomocí kapacitních prstenců a kapacitních štítů. Důležitou ochranou proti přepětí je použití bleskojistek a omezovačů přepětí. [3]

#### 3.1 Parametry transformátoru

**Tabulka 6 - Parametry jedné fáze primárního vinutí transformátoru [5]**

veličina	značka	hodnota	jednotka
délka	$l$	0,6	m
odpor	$R$	0,0211	$\Omega$
indukčnost	$L$	1,57	H
příčná kapacita	$C$	358	pF
podélná kapacita	$K$	14,32	pF

Příčná kapacita vinutí se neměří, proto bude dopočítána dle vzorce (1). Bude se uvažovat  $\gamma = 5$ , pak

$$\gamma = \sqrt{\frac{C}{K}} \rightarrow K = \frac{C}{\gamma^2}$$
$$K = \frac{358 \cdot 10^{-12}}{5^2} = 14,32 \text{ pF}$$

Jelikož se bude model jedné fáze primárního vinutí transformátoru v programu ATP skládat ze 300 elementů, je nutné vypočítat parametry pro jeden délkový element

**Tabulka 7 – Parametry pro jeden délkový element**

veličina	značka	hodnota	jednotka
délka	$l_1$	2	mm
odpor	$R_1$	$7 \cdot 10^{-5}$	$\Omega$
indukčnost	$L_1$	5,23	mH
příčná kapacita	$C_1$	$1,193 \cdot 10^{-6}$	$\mu\text{F}$
podélná kapacita	$K_1$	$4,296 \cdot 10^{-3}$	$\mu\text{F}$

$$l_1 = \frac{l}{300} = \frac{0,6}{300} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 2 \text{ mm}$$

$$R_1 = \frac{R}{300} = \frac{0,0211}{300} = 7 \cdot 10^{-5} \Omega$$

$$L_1 = \frac{L}{300} = \frac{1,57}{300} = 5,23 \cdot 10^{-3} \text{ H} = 5,23 \text{ mH}$$

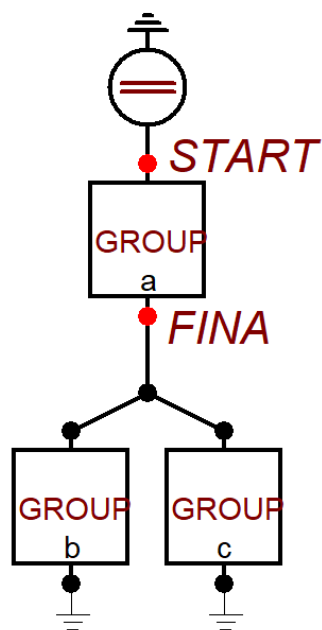
$$C_1 = \frac{C}{300} = \frac{358 \cdot 10^{-12}}{300} = 1,193 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 1,193 \cdot 10^{-6} \mu\text{F}$$

$$K_1 = K \cdot 300 = 14,32 \cdot 10^{-12} \cdot 300 = 4,296 \cdot 10^{-9} \text{ F} = 4,296 \cdot 10^{-3} \mu\text{F}$$

### 3.2 Odezva distribučního transformátoru na jednotkový skok

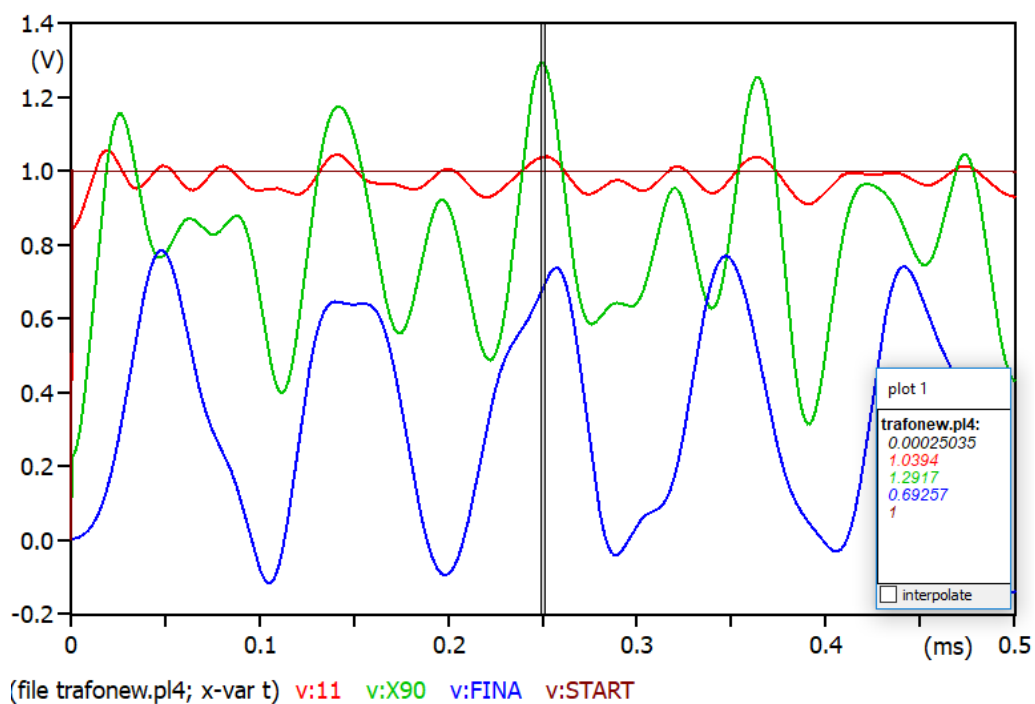
Dříve než podstoupí distribuční transformátor 22/0,4 kV simulaci rázových jevů v důsledku úderu blesku do vedení, je nutné zjistit odezvu primárního vinutí na jednotkový skok, aby byla získána lepší představa o rozložení napětí podél celého primárního vinutí, které se nechová jako tři oddělené cívky, ale jako propojený systém, jelikož uzel transformátoru je izolovaný. V případě, že by uzel transformátoru byl uzemněný, fáze by se vzájemně ovlivňovaly pouze v rámci elektromagnetické indukce, ale jinak veškeré přepětí by bylo svedeno ze zasažené fáze do země, aniž by přešlo do jiných fází.

Transformátor tvoří 3 cívky reprezentující jednotlivé fáze, které jsou zapojeny do hvězdy. Model cívky je použit z předchozí kapitoly. Jednotkový skok bude přiveden na fázi A (GROUP a). Fáze B a C (GROUP b a GROUP c) jsou uzemněny, avšak v reálné soustavě by k nim byla připojena vlnová impedance vedení. Vlnová impedance vedení je však výrazně nižší než impedance cívky, a proto je možné tuto vlnovou impedanci zanedbat a uzemnit konce fází B a C.



Obrázek 21 - Schéma primárního vinutí distribučního transformátoru

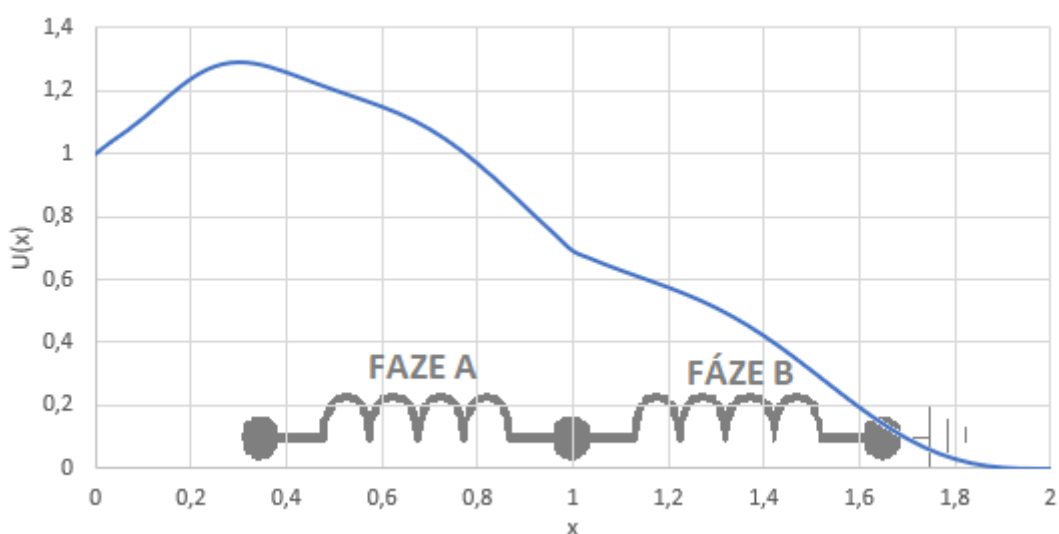
Pro vytvoření jednotkového skoku opět použijeme stejnosměrný zdroj DC type 11. Amplituda bude nastavena na 1 V a parametr Tstart nastavený na -1 s.



Obrázek 22 - Průběh napětí v čase na začátku, v maximu a na konci fáze A



I když je uzel transformátoru izolovaný, fáze B a C jsou uzemněny. V tomto případě se potom obvod chová jako sériová kombinace cívky A a paralelní kombinace cívek B a C, které jsou uzemněny. Ve výsledku je možné si představit toto zapojení jako jednu uzemněnou cívku. Průběhy v obrázku jsou toho jasným důkazem, jelikož dochází k postupnému nárůstu napětí od začátku cívky až přibližně k první čtvrtině, kde bylo dosaženo největšího přepětí  $U = 1,292 \text{ V}$ , konkrétně na 90. délkovém elementu. Zatímco napětí na konci bylo daleko menší než v první čtvrtině, což odpovídá rozložení napětí podél cívky s uzemněným koncem.



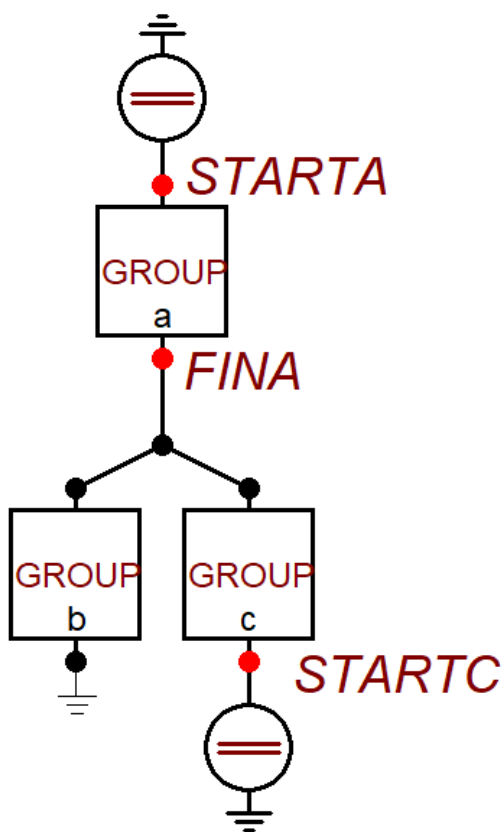
Obrázek 23 - Rozložení napětí podél fáze A a fáze B (stejně podél fáze C, která je paralelně k B)

Tento fakt potvrzuje i rozložení napětí podél fáze A a B (stejně i podél fáze A a C). Na začátku fáze A je napětí zdroje čili hodnota jednotkového skoku 1 V. Následuje nárůst napětí, který kulminuje na 90. elementu hodnotou  $U = 1,292 \text{ V}$ , což odpovídá přibližně první čtvrtině vinutí fáze A. Od tohoto místa napětí už jen klesá až ke konci vinutí fáze A ( $x = 1$ ) a pokles pokračuje i skrz vinutí fáze B až k nule. Impedance zasažené fáze bude dvojnásobná proti impedanci ostatních fází a v uzlu transformátoru bude mít průběh napětí zlom, což je z průběhu patrné. Model demonstruje, že jednotkový skok, přivedený na fázi A, ovlivní i fáze B a C. Nejvíce namáhána bude vstupní svorka fáze A, fáze B a C již nebudou vystaveny tak silnému přepětí, jelikož dojde k útlumu na odporu vinutí fáze A.

V případě, že by byl uzel transformátoru uzemněný, k ovlivnění zbylých dvou fází by nedošlo, jelikož by byly odděleny uzemněným uzlem, skrz který by bylo přepětí svedeno do země.

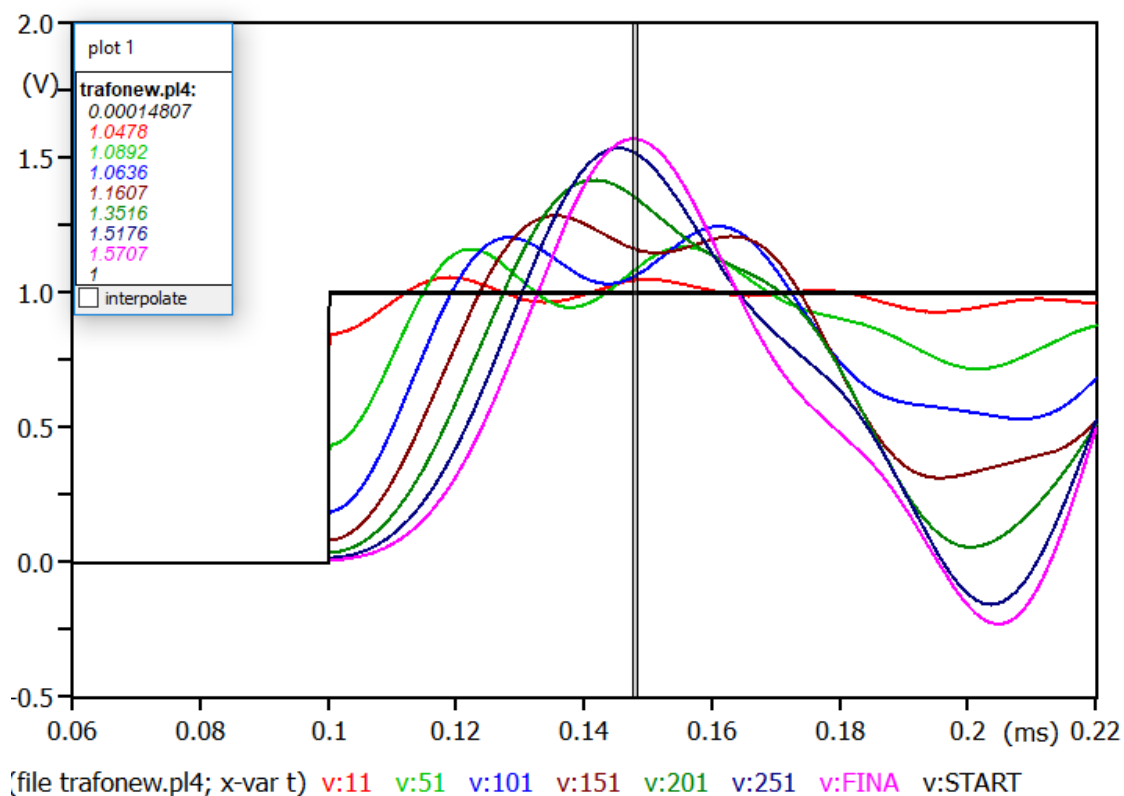
Velmi často není zasažena pouze jedna fáze, ale mohou být zasaženy dvě nebo všechny tři, což nastolí zcela jiné poměry v obvodu. Pokud je jednotkový skok přivedený na více fází, dojde k superponování vln zdrojů. Změní se tím celé napětové rozložení podél cívky. Model zůstane stejný jako v předchozím případě, ale zdroj jednotkového skoku bude přivedený na fáze A a C, které jsou shodné. Zdroje jednotkového skoku se sepnou ve stejnou chvíli se stejnou amplitudou 1 V. Z tohoto důvodu postačí měření pouze na fázi A, jelikož na fázi C budou vycházet průběhy totožné.

Oba zdroje budou sepnuty ve stejný okamžik, jež reprezentuje parametr  $T_{start}$  nastavený na 0,0001 s. Tato hodnota zajistí, že zdroje budou zapnuty již před zahájením měření. Amplituda bude nastavena na hodnotu 1 V.



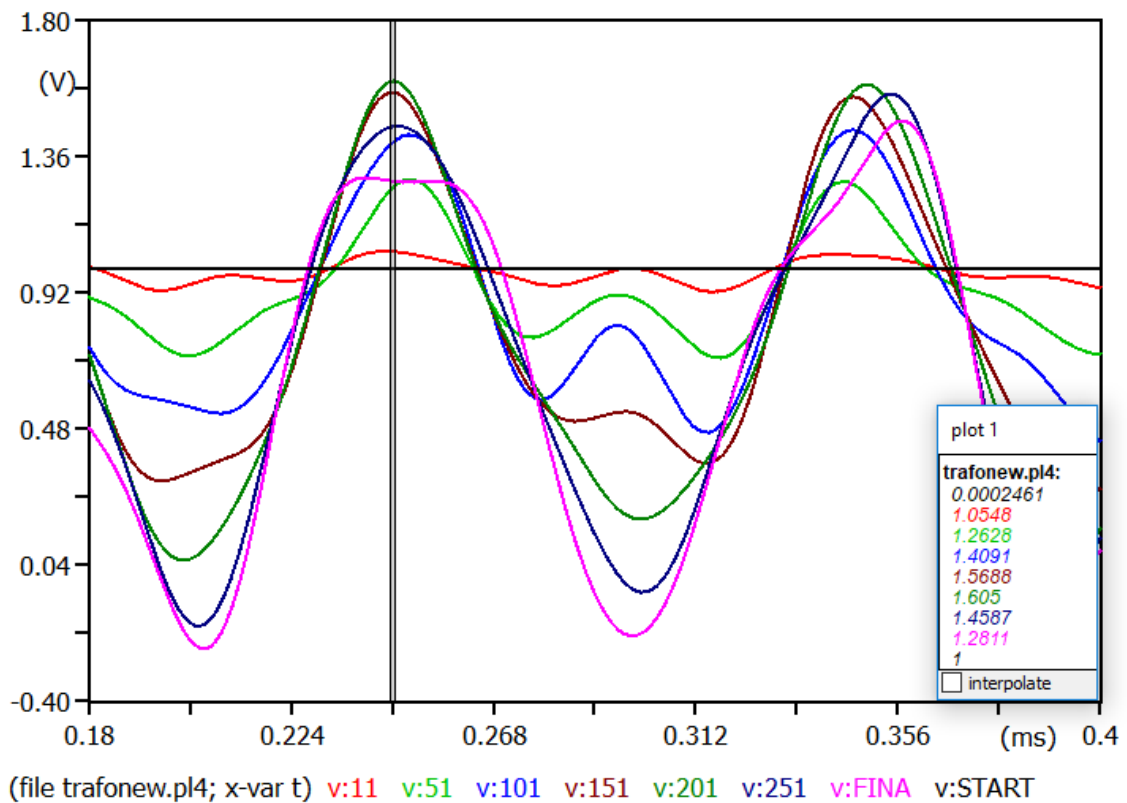
Obrázek 24- Schéma primárního vinutí distribučního transformátoru napájeného dvěma DC zdroji

Pokud budou zdroje připojeny proti sobě a sepnou současně, obě fáze budou čelit jednotkovému skoku. Obvod začne kmitat, jelikož je tvořen cívkami a kondenzátory. Napětová vlna se šíří od zdroje A a od zdroje C k uzlu transformátoru (označen FINA), kde se vlny potkají. Z hlediska první periody dosáhne obvod maximálního přepětí právě v místě střetu vln čili v izolovaném uzlu transformátoru. Tento fakt je vidět v grafu (viz Obrázek 25), který zobrazuje časové průběhy napětí na vybraných elementech podél celé cívky. Největší přepětí vykresluje fialový průběh, který charakterizuje napětí v uzlu transformátoru.



Obrázek 25 - Časový průběh první periody napětí podél vinutí transformátoru napájeného do 2 fází jednotkovým skokem

Napěťová vlna se v místě uzlu transformátoru dělí do ostatních dvou fází v poměru vlnových impedancí těchto fází. V dalších periodách tak nastane skutečnost, že se v napájené fázi A (stejně platí i pro fázi C) střetnou vlny od zdroje A a zároveň dělená vlna od zdroje C. Jelikož platí princip superpozice, amplitudy vln se sečtou.

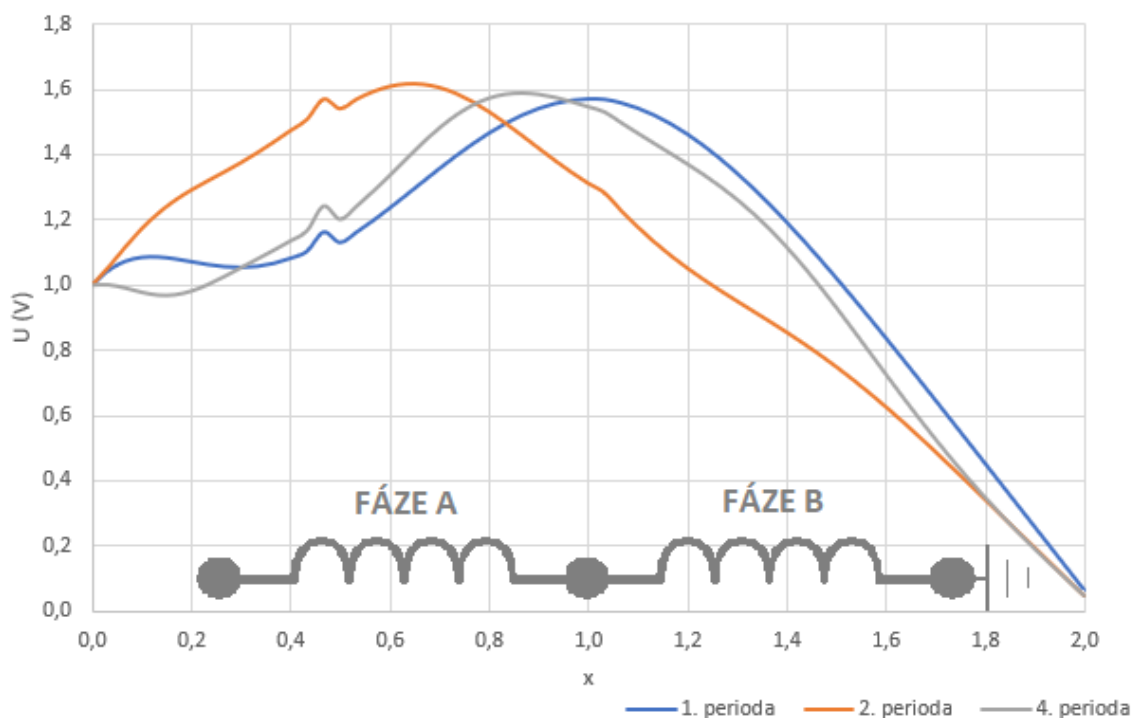


Obrázek 26 - Časový průběh dalších period napětí podél vinutí transformátoru napájeného do 2 fází jednotkovým skokem

Součtem amplitud napěťových vln dojde k posunutí maximálního přepětí z izolovaného uzlu transformátoru směrem ke zdroji v obou fázích a vzniknou tak dvě maxima. V čase se tato maxima pohybují mezi druhou třetinou a izolovaným uzlem transformátoru. Zároveň přepětí vzniklé součtem vln dosáhlo ještě větší hodnoty než v první periodě v izolovaném uzlu transformátoru. Během první periody přepětí dosáhlo hodnoty 1,57 V, zatímco během periody druhé dosáhlo napětí hodnoty až 1,61 V.

Záporná půl periody, v izolovaném středu transformátoru, kmitá až do záporných hodnot. Největší překmity dosahují hodnoty až -0,27 V.

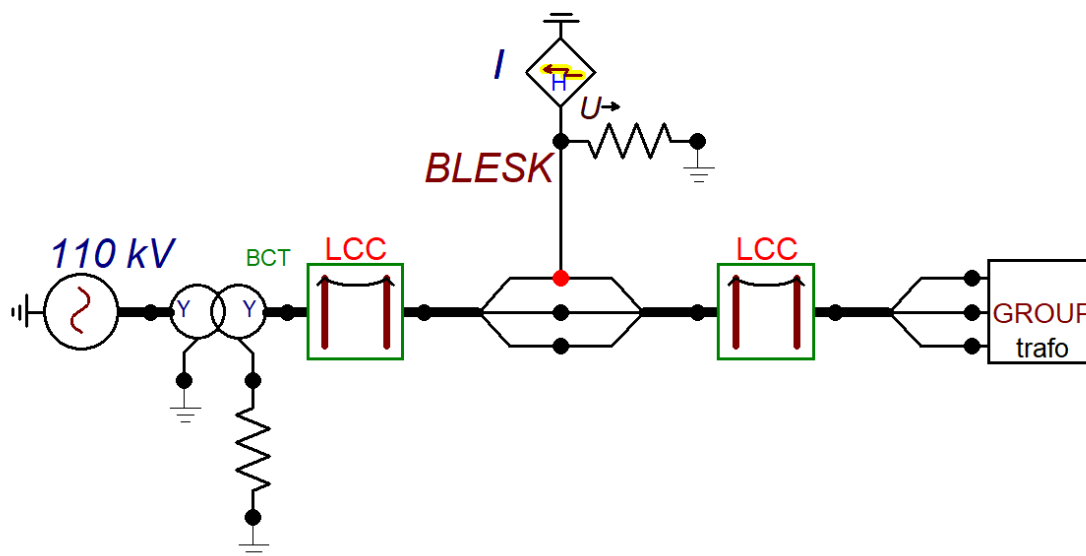
Obrázek 27 ukazuje rozložení napětí podél vinutí transformátoru. Průběhy jsou zobrazeny ve třech časech a je z nich jasně vidět, že maximální napětí se v čase posouvá podél vinutí cívky. V první periodě je maximum přesně v izolovaném středu, následně v dalších periodách se posouvá směrem ke zdroji. Stejný průběh vznikne i na druhé napájené fázi, tedy maxima musí být v daný okamžik dvě. Jelikož je jedna fáze uzemněna, celý systém se chová jako uzemněná cívka a maximum se pohybuje přibližně kolem první čtvrtiny. Druhý zdroj tedy způsobí pouze kmitání maxima podél vinutí.



Obrázek 27 - Rozložení napětí podél napájené fáze A a uzemněné fáze B

### 3.3 Model distribuční soustavy v ATP

Aby bylo možné zjistit, jak velká přepětí nastanou po úderu blesku do vedení, je nutné sestavit kompletní model distribuční soustavy 22 kV. Tato soustava bude napájena z nadřazené sítě 110 kV a bude končit distribučním transformátorem 22/0,4 kV. Část modelu použita z předmětu DMME (Diagnostické metody a modelování) doc. Dr. Ing. Veleoslava Macha.



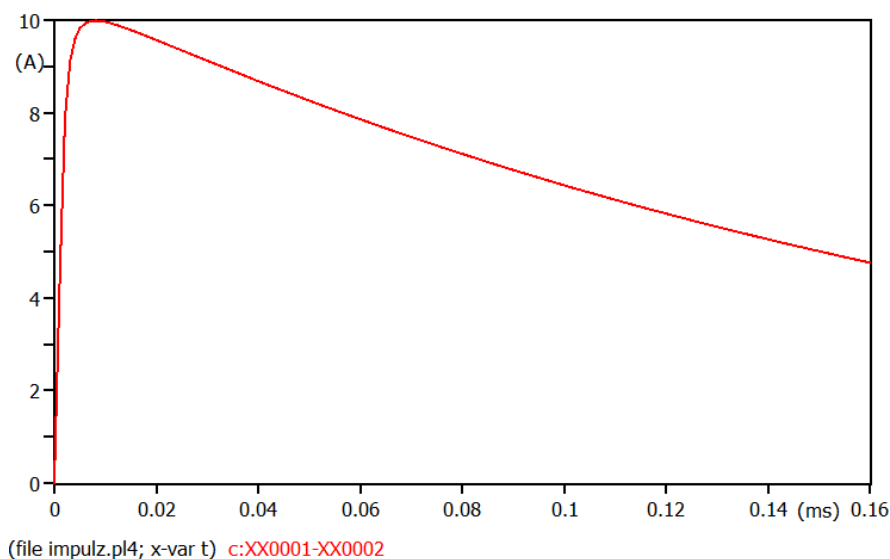
Obrázek 28 - Schéma distribuční soustavy

Model je napájený nadřazenou soustavou 110 kV, která je reprezentována třífázovým střídavým napětovým zdrojem. Nastavená amplituda je 110 kV, frekvence je zvolená 50 Hz, stejná jako kmitočet sítě. Parametr StartA, je nastaven na hodnotu -1, což zajistí, že v okamžiku zapnutí simulace již zdroj funguje v ustáleném stavu.

Za napájecí soustavou 110 kV se nachází transformátor 110/22 kV o výkonu 40 MVA. Transformátor je v modelu realizován pomocí prvku BCTRAN. Jedná se o třífázový transformátor, jehož primární vinutí je zapojeno do hvězdy a střed je uzemněný, jelikož síť 110 kV se provozují s uzemněným uzlem transformátoru. Sekundární vinutí je rovněž zapojeno do hvězdy a uzel je nepřímo uzemněný přes odpor 1 M $\Omega$ .

Za transformátorem následuje třífázové vedení, které je rozděleno na 2 poloviny, každá dlouhá 300 m. Vedení je realizováno pomocí prvku LCC. Jedná se o model vedení typu Bergeron, což je model frekvenčně nezávislý a slouží pro sledování přechodného jevu v obvodu s rozprostřenými parametry.

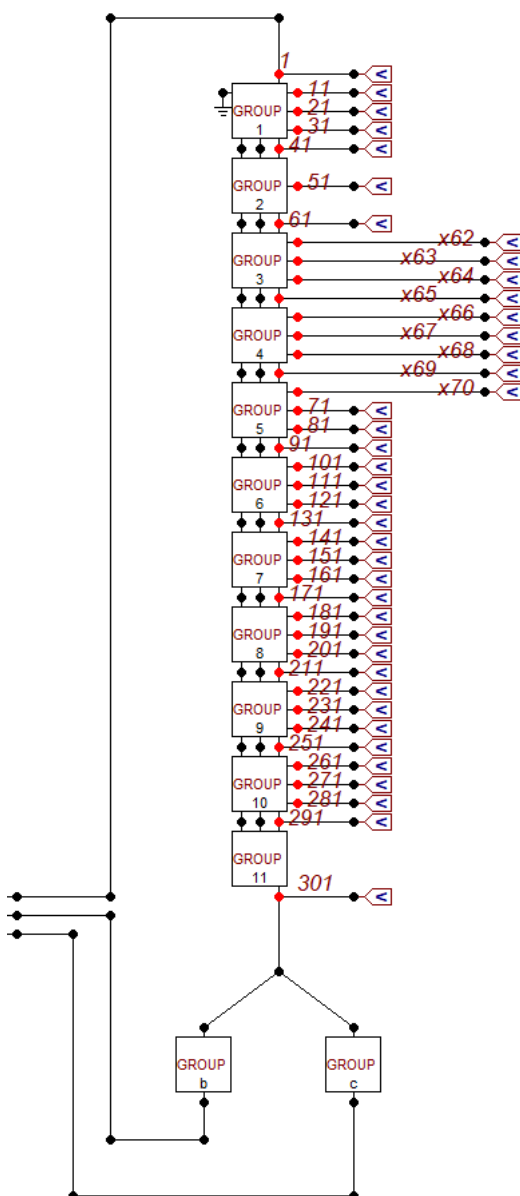
Mezi oběma LCC členy, představující poloviny vedení, se nachází dva prvky SPLITER. První kvůli rozdělení každé fáze zvlášť a druhý pro jejich opětovné sloučení. Fáze je potřeba rozdělit, jelikož simulace bude počítat s tím, že blesk udeří pouze do jedné fáze, nikoli do všech tří. K fázi A je připojen zdroj proudového impulsu typu HEIDLER. Amplituda proudového impulsu je nastavena na 10 000 A. Parametr T<sub>f</sub>, který představuje dobu čela je nastaven na 8  $\mu$ s a parametr tau, který představuje dobu půl týlu je nastaven na 20  $\mu$ s. Jedná se tedy o normalizovaný tvar impulsu používající se pro simulaci bleskových proudů. Bylo by možné také použít impuls 4/10  $\mu$ s, popřípadě dlouhý proudový impuls 10/700  $\mu$ s. Překmit impulsu do opačné polarity by neměl překročit 20 % amplitudy. Parametr Tstart je nastaven na 0. Ve výsledných průbězích tak bude vidět stav vedení před i po zásahu vedení bleskem.



Obrázek 29 - Proudový impuls 8/20 představující blesk

K impulznímu zdroji proudu, představující atmosférický impulz (blesk), je paralelně připojen odpor  $1\text{ M}\Omega$  z důvodu linearity v obvodu. V případě, že by tam tento odpor nebyl, mohlo by dojít k chybě programu ve výpočtu.

Poslední složka modelu je seskupení prvků GROUP s názvem „trafo“. V tomto uskupení je schován transformátor 22/0,4 kV. Tento transformátor zakončuje distribuční soustavu a převádí vysoké napětí na napětí nízké. Z prvku GROUP jsou vyvedeny postupně z vrchu uzly 1, 2, 3, které odpovídají fázím A, B, C.



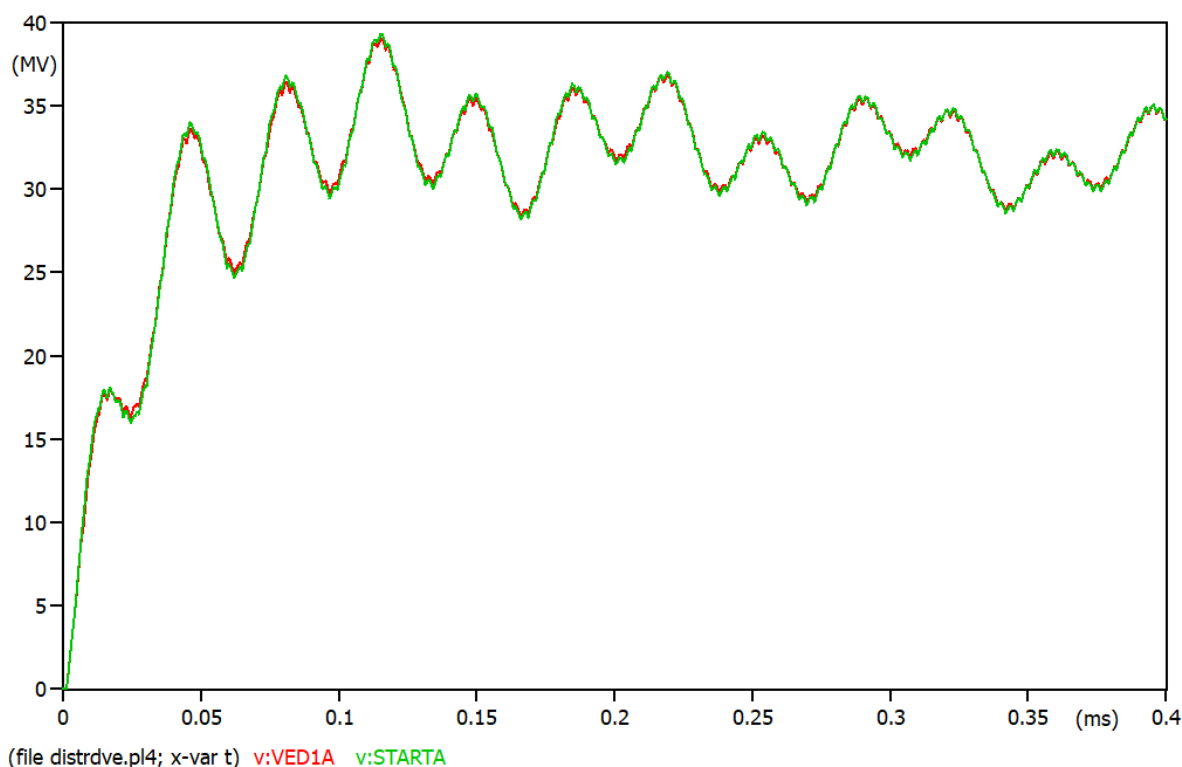
Obrázek 30 - Distribuční transformátor 22/0,4 kV (GROUP "trafo")

V modelu je sestaveno pouze primární vinutí, protože mezi primárním vinutím a transformátorem 110/22 kV bude docházet k odrazu vln. Primární vinutí transformátoru 22/0,4 kV je zapojeno do

hvězdy a uzel transformátoru je izolovaný, což je typické pro síť 22 kV. Každá fáze je tvořena modelem cívky z předchozí kapitoly, fáze B a C jsou seskupeny kvůli menším prostorovým rozměrům.

### 3.4 Zásah distribuční soustavy atmosférickým výbojem

Do vedení 22 kV v ustáleném stavu udeří blesk o amplitudě 10 kA. Nejprve je na místě zjistit, jak se budou šířit vlny po vedení v čase. Pro tento účel se umístí napěťové sondy na oba konce vedení. Jedna sonda bude za sekundárním vinutím transformátoru 110/22 kV, druhá bude před primárním vinutím transformátoru 22/0,4 kV. V reálném stavu by byla distribuční soustava vybavena omezovači přepětí nebo bleskojistkami, jelikož bez těchto ochrany by měl blesk destruktivní účinky na mnohá zařízení. V simulaci ochrany použité nejsou, aby bylo možné analyzovat, jak se přepětí šíří, jakých hodnot dosáhne a jak se rozloží podél vinutí transformátoru.

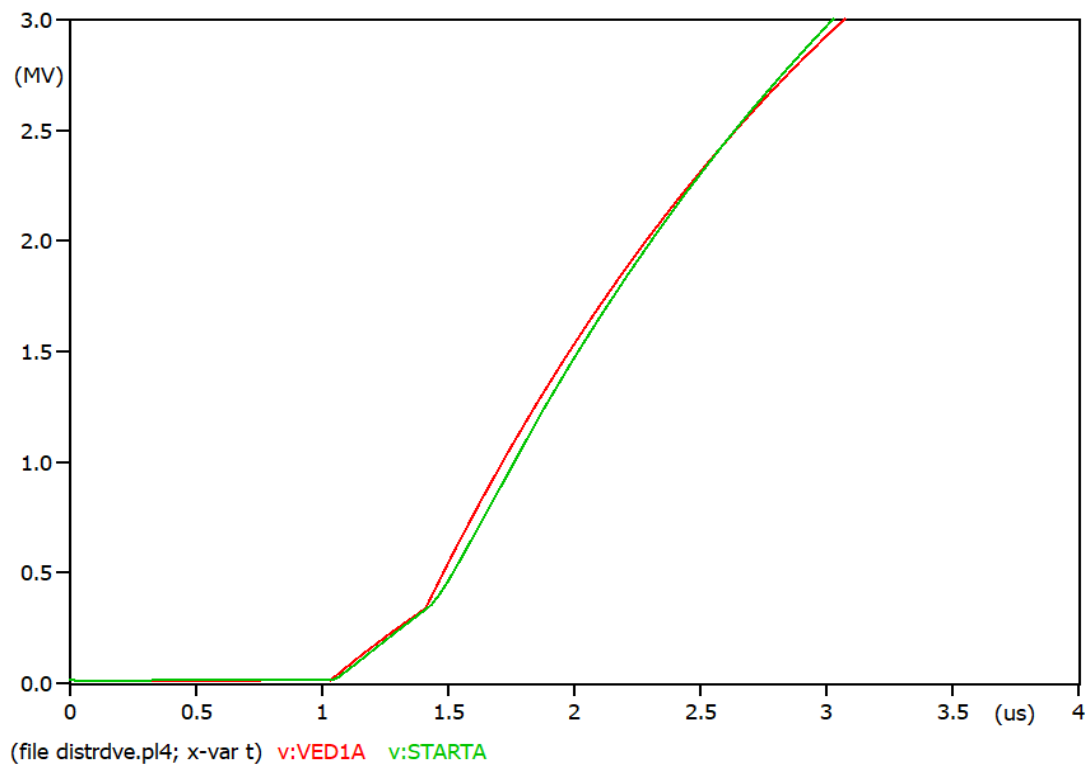


Obrázek 31 - Časové průběhy napětí na koncích vedení

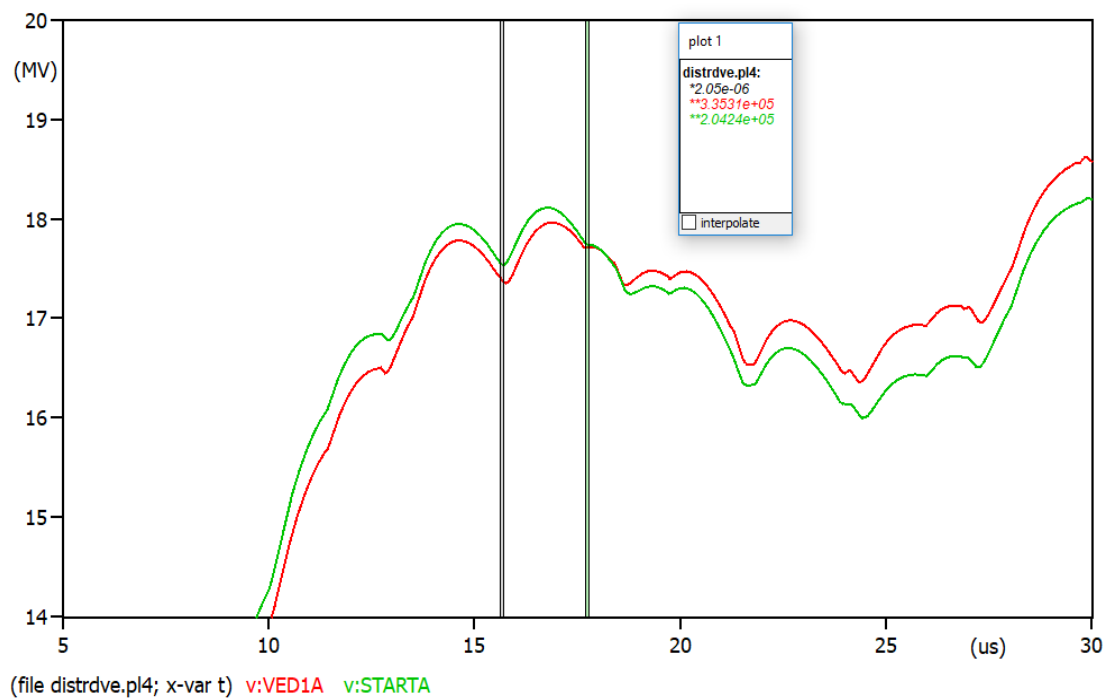
Napěťová vlna se šíří po vedení rychlostí světla, tedy  $300 \text{ m}/\mu\text{s}$ . Jelikož v simulaci udeřil blesk přesně doprostřed vedení, tak k oběma koncům je to přesně 300 m. Vlna tak dorazí na oba konce za  $1 \mu\text{s}$  (viz Obrázek 32). V tomto místě dojde k odrazu vlny a ta se šíří zpět po vedení k druhému konci, kam to bude trvat  $2 \mu\text{s}$  (protože  $300 \text{ m} + 300 \text{ m} = 600 \text{ m}$ ). Vlny se tedy budou odrážet od obou konců každé  $2 \mu\text{s}$  (viz Obrázek 33) a navzájem se superponovat. Maximální přepětí dosáhne téměř 40 MV. Jelikož se nejedná o bezeztrátové vedení, začne docházet k útlumu amplitud vln a přepětí



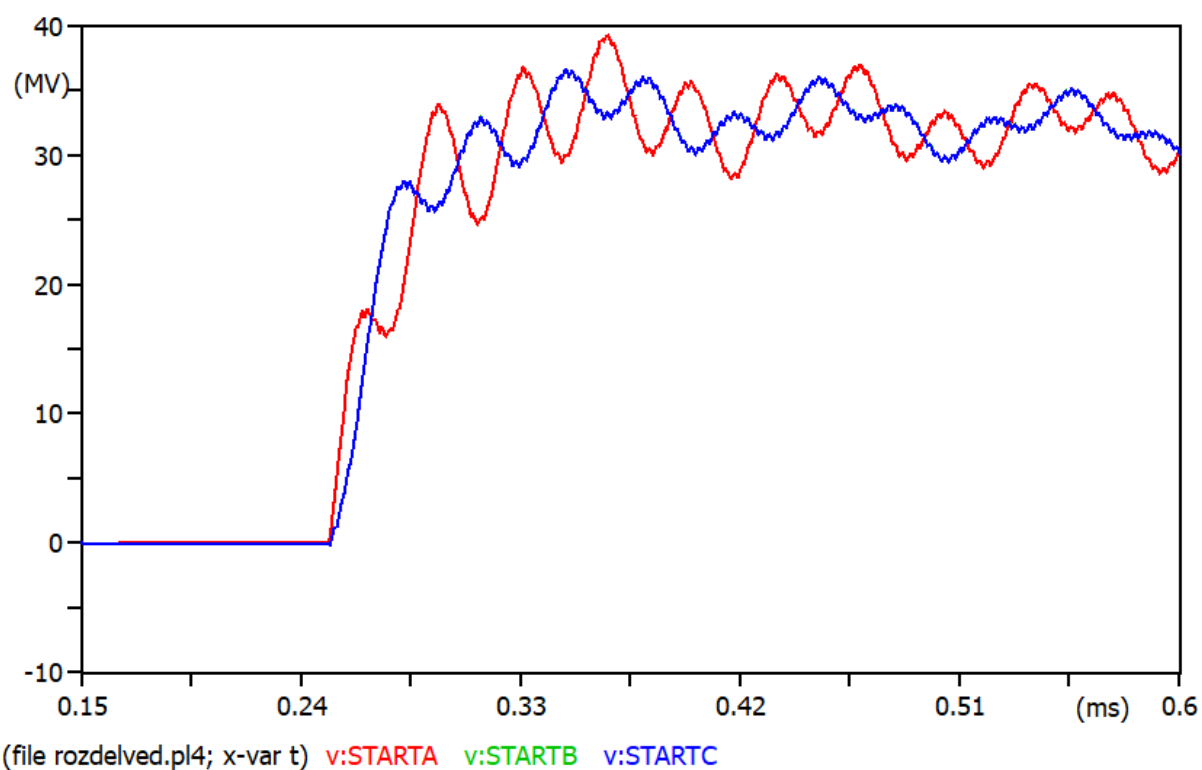
začne pomalu klesat. Velikost maximálního přepětí je velmi závislá na délce vedení, čím je vedení delší, tím větší útlum nastane.



Obrázek 32 - Příchod první napěťové vlny na konec vedení

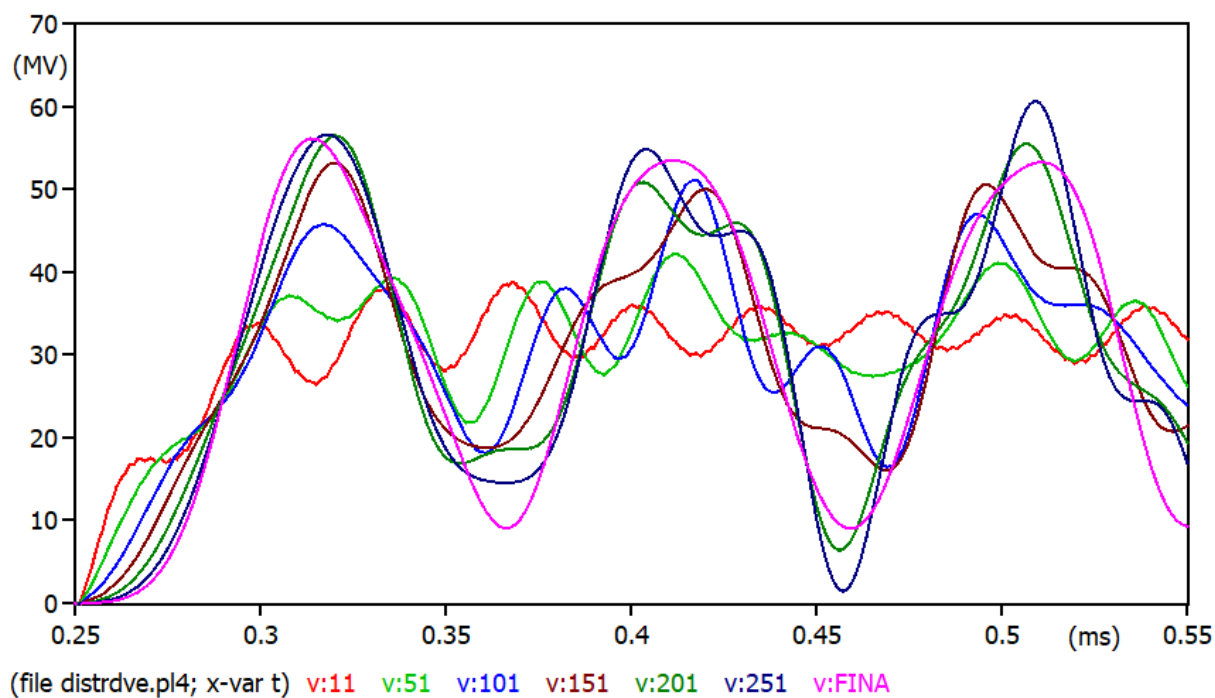


Obrázek 33 – Odrazy a šíření vln po vedení



Obrázek 34 – Průběh napětí na vstupu fáze A, B, C po úderu blesku do vedení

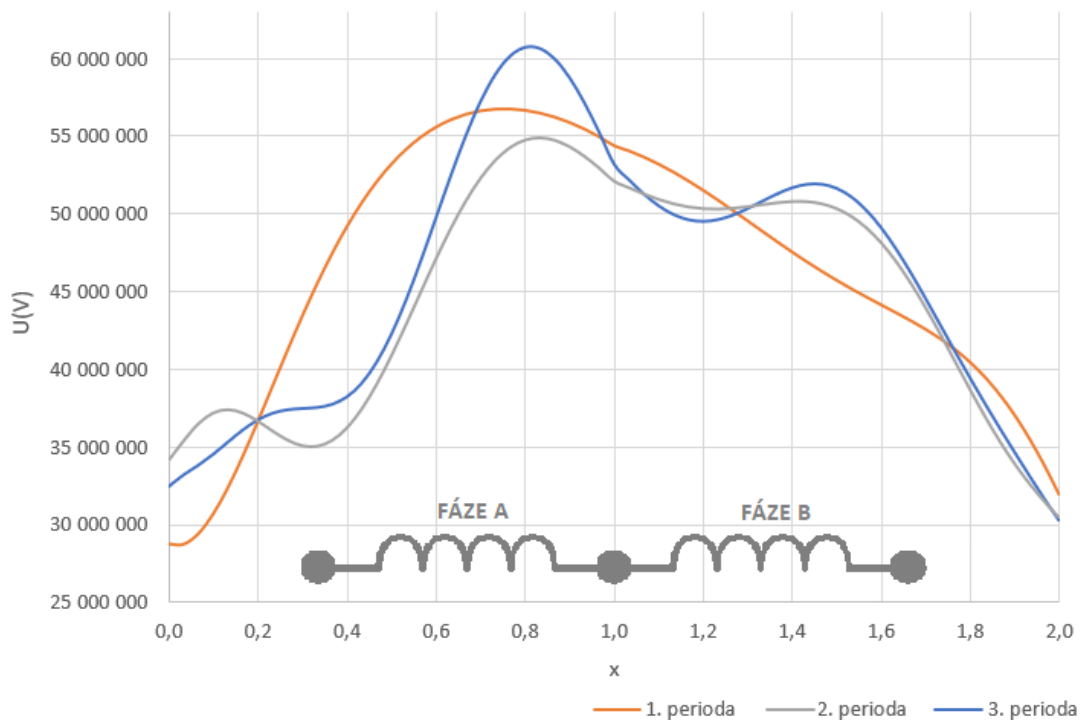
Během úderu blesku do fáze A, dojde k naindukování napětí i do sousedních fází. Přepětí tak postihne všechny fáze (viz Obrázek 34).



Obrázek 35 – Časový průběh napětí v uzlech podél fáze A

V momentu, kdy dorazí napěťová vlna do transformátoru, který je opět uskupení kapacit a indukčností a tvoří tak oscilační obvod, dojde k oscilacím, které sahají až k 60 MV (viz Obrázek 35), což je 50 % nárůst oproti maximálnímu přepětí, které se objevilo na kocích vedení, kde bylo naměřeno pouze 40 MV. Ve zbylých dvou nezasažených fázích bude situace obdobná, jelikož naindukované vlny se šířili po vedení i v sousedních vodičích (viz Obrázek 34).

Nyní je podstatné zjistit, ve kterém místě transformátoru bude přepětí největší (viz Obrázek 36).

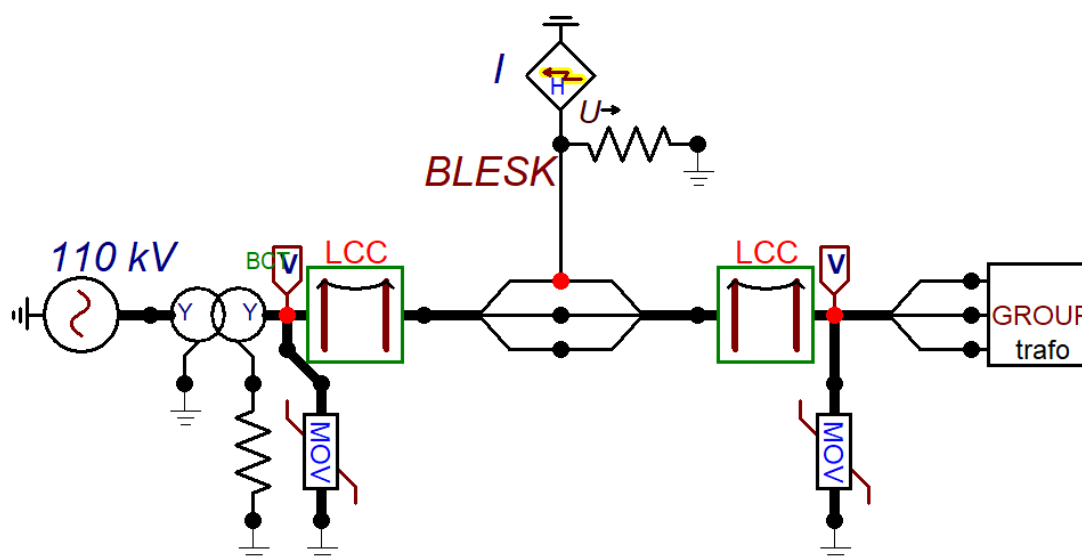


Obrázek 36 – Rozložení napětí podél vinutí transformátoru po úderu blesku do vedení

Rozložení napětí je vykresleno pro první tři periody v čase, kdy napětí dosáhlo svého maxima. Obrázek 36 zobrazuje rozložení napětí pouze podél fáze A a fáze B, podél fáze C by odpovídalo rozložení ve fázi B. Z obrázku je patrné, že maximálního přepětí bylo dosaženo ve třetí periodě na 241. elementu. Během první periody nastalo maximum napětí na 231. elementu a během periody druhé na 251. elementu, z čehož plyne, že maximum kmitá podél délky cívky v čase stejně, jako při odezvě transformátoru na jednotkový skok, když byl napájen dvěma zdroji. Posuv maximálního přepětí je způsoben superponováním vln, které rovněž způsobuje i větší zvlnění průběhů rozložení napětí ve druhé a třetí periodě, oproti vyhlazenému průběhu v periodě první (viz Obrázek 36). Jelikož do fáze A na vedení udeří blesk a napětí se naindukuje i do sousedních fází, přijdou přepětíové vlny na všechny tři vstupy transformátoru, proto se střetnou uvnitř transformátoru a začnou se superponovat na sebe.

### 3.5 Ochrana transformátoru svodičem přepětí

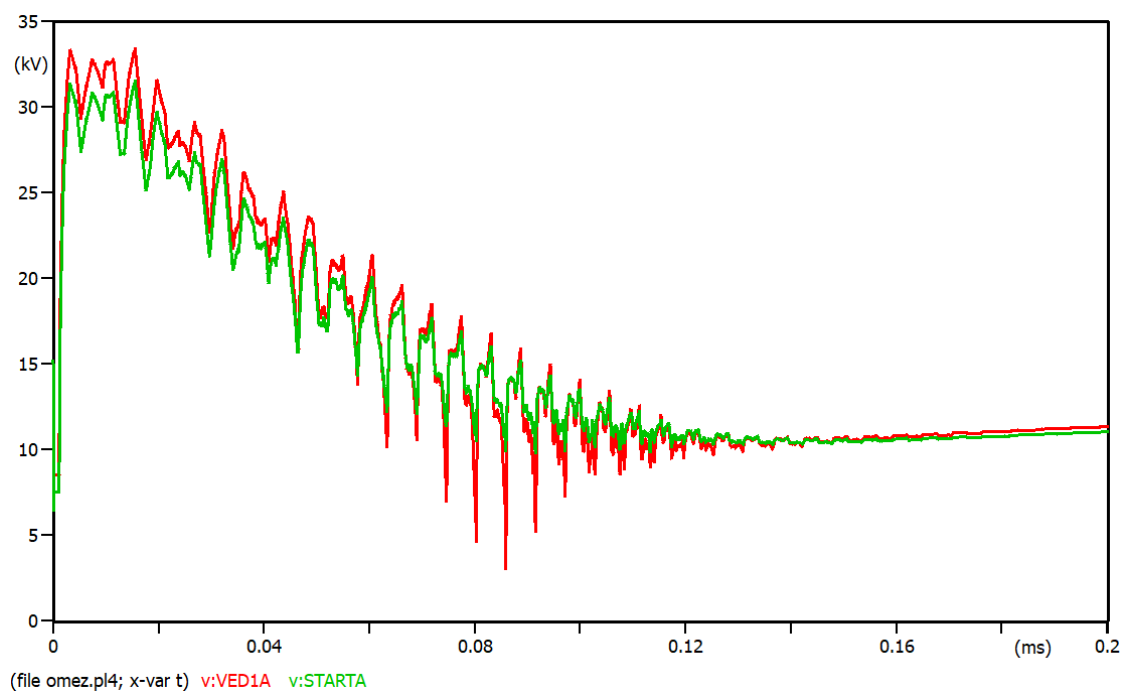
Přepětí v řádech megavoltů, které vzniklo v soustavě nechráněné svodičem přepětí v předchozí kapitole, je pouze teoretické. Ve skutečnosti by mělo extrémně destruktivní účinky na všechna zařízení v soustavě. Aby tento stav nenastal, používají se v síti bleskojistky anebo omezovače přepětí. V obou případech se jedná o nelineární odpor, v případě bleskojistky na bázi SiC (karbid křemíku) a v případě omezovače přepětí na bázi ZnO (oxid zinečnatý). Bleskojistka je navíc doplněna o sériové jiskřiště. Jakmile dojde k překročení zapalovacího napětí na bleskojistce, zapálí se oblouk na jiskřišti a bleskojistkou začne téct proud do země. Nelineární odpor má při velkém proudu malý odpor a opačně, při malém proudu odpor velký, což zajišťuje uhašení oblouku a omezení následného proudu. [3]



Obrázek 37 – Schéma distribuční soustavy se svodičem přepětí

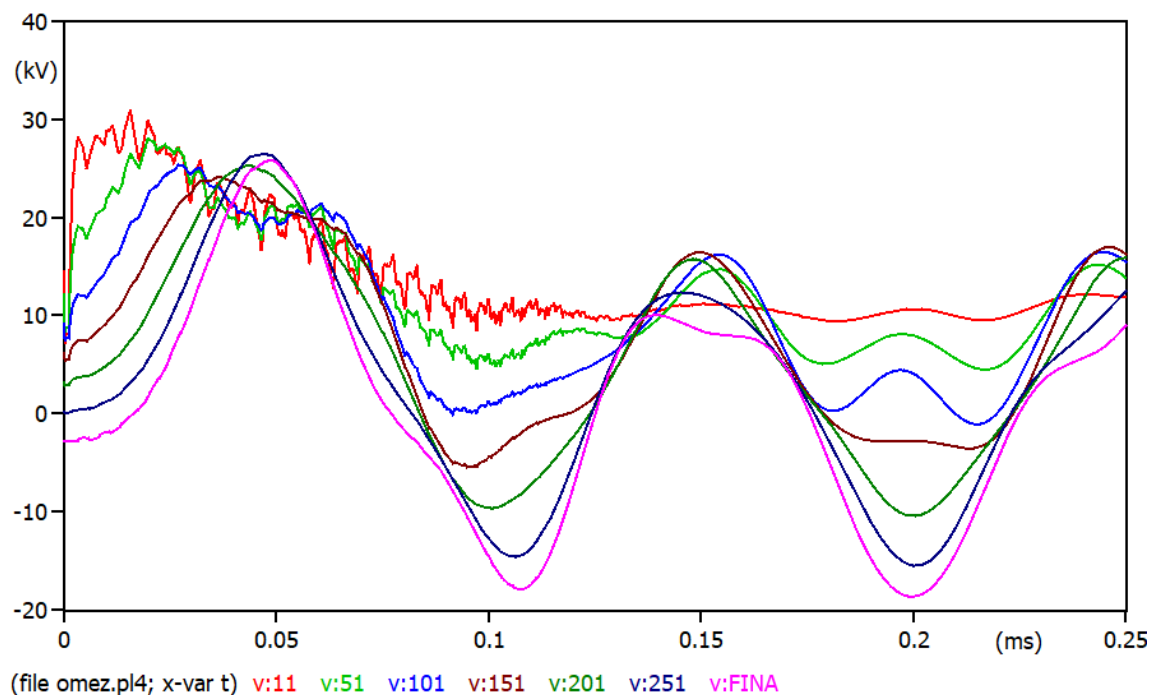
Do distribuční soustavy byly přidány jako svodiče přepětí dva prvky MOV type 92. Jedná se o nelineární rezistor exponenciálně závislý na proudu. V nastavení je potřeba nastavit charakteristiku pomocí bodů, kdy má prvek reagovat. Použil jsem charakteristiku tvořenou dvěma body. První bod určuje, že při proudu 5 kA prvek vypíná v 30 kV a druhý bod při proudu 10 kA vypíná v 36 kV. Tato charakteristika je pro transformátor 22/0,4 kV, pro transformátor 110/22 kV je použita charakteristika 5 kA - 32 kV a 10 kA - 38 kV.

Jeden svodič je na vstupu primárního vinutí transformátoru 22/0,4 kV a druhý je na sekundární straně transformátoru 110/22 kV. Tím jsou chráněny oba transformátory před atmosférickými výboji.

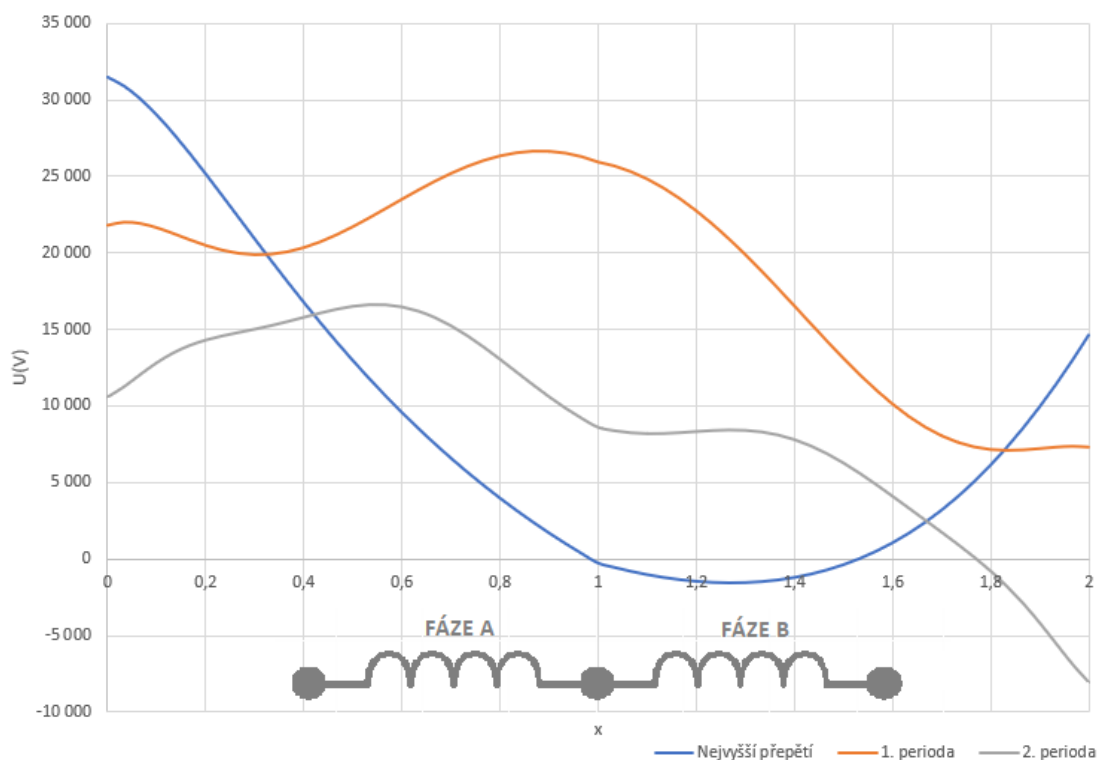


Obrázek 38 - Časový průběh napětí po reakci svodiče přepětí

Z průběhu (viz Obrázek 38) je patrná reakce svodičů přepětí na napěťovou vlnu, která se šířila po vedení. Okamžitě po překročení nastavené hodnoty napětí byl zbytek výboje sveden svodičem přepětí do země. Z původní hodnoty v MV je nyní přepětí kontrolované ochranným prvkem a nepřesáhne nastavenou hodnotu, což ochrání drahá elektrická zařízení před nebezpečným přepětím, která mohou způsobit jejich destrukci.



Obrázek 39 – Časový průběh napětí v uzlech podél fáze A



Obrázek 40 - Rozložení napětí podél vinutí transformátoru, jemuž je předřazen svodič přepětí

V okamžiku, kdy vlna přišla na vstupní svorky transformátoru, nejvíce zatížené byly vstupní svorky (viz Obrázek 40 modrý průběh), kde bylo zároveň naměřeno největší přepětí. Toto přepětí bylo však kontrolovaně omezeno svodičem přepětí a nepřesáhlo tudíž dovolenou mez. V dalších periodách bylo maximum napětí podél vinutí transformátoru vždy menší a opět kmitalo podél vinutí zasažené fáze A.

## Závěr

Cílem první úlohy byla tvorba modelu homogenní cívky v programu ATP. Parametry cívky pocházejí ze samostatného programu „Rázy“, který byl zadán v rámci předmětu Technika vysokého napětí (TVN) doc. Dr. Ing. Velezlava Macha. Zadání bylo v rámci diplomové práce rozšířeno o činný odpor  $50 \Omega$ . Vycházeno bylo z Wagnerova schématu cívky s rozprostřenými parametry, který byl však převeden do diskretních hodnot. Celkem tak model tvoří 300 délkových elementů. Výsledné průběhy budou složeny z diskretních hodnot, proto bylo nutné zvolit optimální počet elementů. Při nízkém počtu by byly průběhy nepřesné a „zubaté“, při větším počtu by byl vliv na přesnost zanedbatelný. Zároveň číslo 300 je dělitelné 3, 4 i 5, a proto budou důležitá místa jako  $1/5$ ,  $1/4$  a  $1/3$  cívky vycházet na celý délkový element. Vývod každého desátého uzlu způsobí chybu 3,33 %, což je přesnost dostatečná. Parametry je nutno přepočítat na délku jednoho elementu, aby je bylo možno zadat do programu ATP. Následně bylo potřeba stanovit maximální délku periody. Pro uzemněný konec cívky vychází  $T_U = 28,66 \mu s$  a pro konec izolovaný  $T_I = 51,16 \mu s$ . Mezní frekvence kmitů je rovna  $f_m = 67,1 \text{ kHz}$ . Program ATP vypočítal v cívce s uzemněným koncem maximální přepětí na 68. uzlu a v čase  $t = 416,3 \mu s$  dosáhlo maximálního překmitu  $U = 1,24 \text{ V}$ , což je nárůst téměř o jednu čtvrtinu oproti napájecímu skokovému napětí 1 V. Rozložení napětí podél cívky zobrazuje, že největší napětí je právě v oblasti první čtvrtiny cívky, což potvrzuje teoretický předpoklad. V cívce s izolovaným koncem bylo dosaženo maximálního překmitu na konci cívky v čase  $t = 331,9 \mu s$  a dosáhlo hodnoty  $U = 2,46 \text{ V}$ . Následuje zobrazení průběhů pomocí programu Rázové jevy, který vytvořil David Jucha. Program má vlastní rozhraní, ve kterém je zapotřebí vyplnit pouze parametry cívky L, C, K a program následně vykreslí požadovaný graf. Pro hledání maxima napětí vystačí prvních 20 period průběhu, jelikož poté by se v reálné situaci začalo projevovat tlumení. Posledním způsobem výpočtu napěťových poměrů v cívce byl vlastní výpočet dle teoretických vzorců s pomocí programu Microsoft Excel. Program ATP i výpočet pomocí teoretických vzorců vycházejí téměř totožně s odchylkou do 0,5 % i přesto, že program ATP uvažuje činný odpor vinutí, avšak teoretický výpočet (i program Rázové jevy) nikoliv. Činný odpor způsobuje tlumení. Význam činného odporu v prvních periodách rázového jevu není příliš významný, jelikož výpočty se shodují s minimální odchylkou. Tlumení se projevuje až v delších časových úsecích v řádech desítek milisekund. Program rázové jevy již měl odchylku větší okolo 6 %. Hlavním nedostatkem programu Rázové jevy je, že uvažuje pouze prvních 5 harmonických kmitů. V případě, že je nutné určit, který kmit dosáhl nejvyšší hodnoty, je počet vyšších harmonických kmitů zahrnutých do výpočtu podstatný, jelikož i drobné hodnoty ve velkém počtu mohou ovlivnit výsledek.

Druhým úkolem bylo vytvořit model primárního vinutí transformátoru 22/0,4 kV. Transformátor byl vytvořen z modelu cívky popsaného v předchozí kapitole. Cívky jsou spojeny do hvězdy a uzel transformátoru je izolovaný, protože síť 22 kV jsou provozovány jako izolované. Nejprve byla provedena odezva transformátoru na jednotkový skok, který byl přiveden na fázi A. Zbýlé dvě fáze jsou uzemněny. V tomto případě se potom obvod chová jako sériová kombinace cívky A a paralelní kombinace cívek B a C, které jsou uzemněny. Ve výsledku je možné si představit toto zapojení jako jednu uzemněnou cívku. Maximálního přepětí  $U = 1,29 \text{ V}$  bylo dosaženo na 90. délkovém elementu. Následně byla provedena zkouška, kdy byl jednotkový skok přiveden na dvě fáze, jelikož velmi často není postižena pouze jedna fáze, ale dvě nebo všechny tři. V tomto případě se vlny zdrojů superponovaly a vytvořily tak maximum přepětí, které kmitalo v čase podél délky cívky. Stejný případ kmitajícího maxima se objevil i v případě úderu blesku do vedení, jelikož ze zasažené fáze došlo

k naindukování napětí na sousední fáze. Napěťové vlny se šířily ve všech třech fázích a střetly se uvnitř transformátoru, kde docházelo k jejich superponování. Maximální přepětí sahá až k hranici 60 MV, avšak takové napětí samozřejmě není reálné, jelikož by dříve došlo ke zničení zařízení. Poslední část se zabývá ochranou zařízení distribuční soustavy pomocí svodičů přepětí. Tyto svodiče zareagovali dle nastavené charakteristiky a přebytečnou energii svedly do země. Přepětí tak nepřesáhlo nastavených 32 a 36 kV.

Závěrem je možno říct, že rázové jevy ve vinutí elektrických strojů jsou velmi nebezpečné, jelikož způsobují obrovská přepětí, která mohou poškodit zařízení a izolaci, což může vést až k průrazu a následnému zkratu. Zařízení je proto nutno chránit svodiči přepětí.



## Literatura

- [1] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. Spálená 51, 113 02 Praha1: Nakladatelství technické literatury, 1978.
- [2] HELLER, Bedřich, Antonín VEVERKA a J. S. VOSPER. *Surge phenomena in electrical machines*. London, 1968.
- [3] MACH, Veleslav. *Technika vysokého napětí*. 2., přeprac. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1161-8.
- [4] BRÁZDA, Daniel. ŠÍŘENÍ VLN NA HOMOGENNÍM VEDENÍ: WAVE PROPAGATION IN HOMOGENEOUS LINE [online]. Brno, 2015 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=102672](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=102672). VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Martin Friedl, Ph.D.
- [5] ŠKODA KONCERN PODNIK – PLZEŇ. Protokol o typových zkouškách trojfázového říditelného transformátoru typu 8 ERH 33M-O. Plzeň.

## Seznam elektronických příloh

- disgr.acp (distribuční soustava – transformátor v group)
- distr.acp (distribuční soustava)
- distrdve.acp (distribuční soustava – měření na dvou fázích transformátoru)
- impulz.acp (tvar bleskového proudu)
- iz.acp (cívka s izolovaným koncem)
- izgr.acp (cívka s izolovaným koncem – v group)
- omez.acp (distribuční soustava – využití svodiče přepětí)
- trafo.acp (transformátor – měření na jedné fázi)
- trafnew.acp (transformátor – měření na dvou fázích)
- uz.acp (cívka s uzemněným koncem)
- uzgr.acp (cívka s uzemněným koncem – v group)